

VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
UNIVERZITNÍ STUDIJNÍ PROGRAMY
Katedra fyziky

Měření vibrací řezné hlavice při použití různých druhů abraziva

Cutting head vibration measurement using different kinds of abrasives

Autor:

Martin Tyč

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Irena Hlaváčová, Ph.D.

Ostrava 2018

Zadání bakalářské práce

Student: **Martin Tyč**
Studijní program: **B1701 Fyzika**
Studijní obor: **1702R001 Aplikovaná fyzika**
Téma: **Měření vibrací řezné hlavice při použití různých druhů abraziva**
Cutting head vibration measurement using different kinds of abrasives.
Jazyk vypracování: **čeština**

Zásady pro vypracování:

Cílem bakalářské práce je na základě provedených měření posoudit možné souvislosti mezi zvolenými parametry technologických postupů abrazivního vodního paprsku a vibracemi hlavice.

Postup řešení:

- 1) Nastudujte základní zásady vibrodiagnostiky a seznamte se s měřicími postupy, které je možno použít při měření vibrací hlavice abrazivního vodního paprsku.
- 2) V databázích WoS a Scopus, vyhledejte 5 - 10 publikací, které se problematikou vibrací kapalinového paprsku zabývaly a proveďte jejich kritické vyhodnocení.
- 3) Seznamte se hlouběji s technologií abrazivního vodního paprsku, na základě teoretické analýzy odhadněte, které veličiny by svými změnami mohly ovlivnit vibrace na hlavici zařízení.
- 4) S pomocí vedoucí práce navrhnete a realizujete experiment na ověření svého odhadu, výsledky svého měření zpracujete v programu Signal Expres.
- 5) Porovnejte své experimentální výsledky s jinými autory a formulujte doporučení, jakým způsobem je možno akcelerometrická měření na abrazivním vodním paprsku využít v technické praxi a v laboratoři.

Seznam doporučené odborné literatury:

HELEBRANT, F. – ZIEGLER, J.: Technická diagnostika a spolehlivost II – Vibrodiagnostika.
VŠB – TU Ostrava, Ostrava 2004, 1. vydání, 178 s., ISBN 80 – 248 – 0650 – 9.

HLAVÁČ, Libor. Model pro řízení parametrů kapalinového paprsku při porušování materiálů v pevné fázi.
2000. Disertační práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.

HLAVÁČ, L.: Teoretický model abrazivního kapalinového paprsku. Sborník vědeckých prací VŠB-TU Ostrava, řada Hornicko-Geologická, ročník XLVII, č.1, 2001, s. 51-62.

LUPTÁK, M.: Detekce procesu řezání kapalinovým paprskem. Doktorská práce, VŠB-TU Ostrava, HGF, Ostrava, 2008, 145 s.

SALOKYOVÁ, Š.: Analýza, modelovanie a simulácia vibrácií vo výrobných systémoch s technológiou vodného prúdu. Disertačná práca, TU v Košiciach, Fakulta výrobných technológií Technickej Univerzity v Košiciach so sídlom v Prešove, Prešov, 2012, 368 s.

VILCOX, S.J., REUBEN, R.L., SOUQUET, P.: The use of cutting force and acoustic emission signals for the monitoring of tool insert geometry during rough face milling. International Journal of Machine Tools &

Manufacture, Volume 37, Issue 4, 1997, pp. 481-494.

TONSHOFF, H.K., JUNG, M., MANNEL, S., RIETZ, W.: Using acoustic emission signals for monitoring of production processes. Ultrasonics, Volume 37, Issue 10, 2000, pp. 681-686

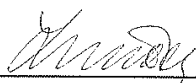
MONNO, M., RAVASIO, C.: The effect of cutting head vibrations on the surfaces generated by waterjet cutting. International Journal of Machine Tools & Manufacture, Volume 45, Issue 3, 2005, pp. 355-363.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

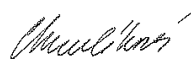
Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Irena Hlaváčová, Ph.D.**

Datum zadání: 31.10.2017

Datum odevzdání: 21.05.2018



prof. Dr. RNDr. Jiří Luňáček
vedoucí katedry



Ing. Zdeňka Chmelíková, Ph.D.
prorektorka pro studium



Prohlašuji, že

-jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu,

-byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo,

-beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3),

-souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé bakalářské práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO,

-bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona,

-bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),

-beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 21.5 2018

.....

podpis

Tímto děkuji mojí vedoucí práce doc. Ing. Ireně Hlaváčové, Ph.D. za připomínky a cenné rady při psaní bakalářské práce a při prováděných experimentech. Také děkuji vedoucímu laboratoře kapalinového paprsku prof. Ing. Liboru Hlaváčovi, Ph.D. za rady a pomoc při měřeních.

Anotace

V bakalářské práci se zabývám měřením a vyhodnocením vibrací řezné hlavice vodního abrazivního paprsku v provozu. V teoretické části se zabírám obecně vodním abrazivním paprskem, vibrodiagnostikou jako disciplínou, kterou používám pro měření, dále vyhodnocuji publikace zabývající se danou problematikou a zamýšlím se nad otázkou, které veličiny by mohly ovlivnit vibrace v řezné hlavici. V další části práce se již věnuji samotnému experimentu: pomocí akcelerometrů byly v programu Signal Express měřeny vibrace na řezné hlavici. Naměřená data zpracovávám v programu LabVIEW a diskutuji o výsledcích. Závěr pojednává o využití výsledků v technické praxi a v laboratoři.

Klíčová slova: vodní abrazivní paprsek, vibrace, LabVIEW, Signal Express

Annotation

In bachelor thesis I am dealing with measurement and evaluation of the vibration of cutting head during material disintegration by AWJ (abrasive water jet). AWJ technology is introduced in general in the theoretical part and basic information about vibrodiagnostics as a discipline used for measurement is presented. Several publications dealing with the topic were evaluated then and quantities likely to affect vibrations in the cutting head were thought about. In the next part of the work I am dealing with an experiment, where I am measuring vibrations of the cutting head with accelerometers controlled by the Signal Express program. I am processing the measured data in program LabVIEW and discussing about results. In the end I am dealing with usage of results in technical practice and in a laboratory.

Keywords: abrasive water jet, vibration, LabVIEW, Signal Express

Obsah

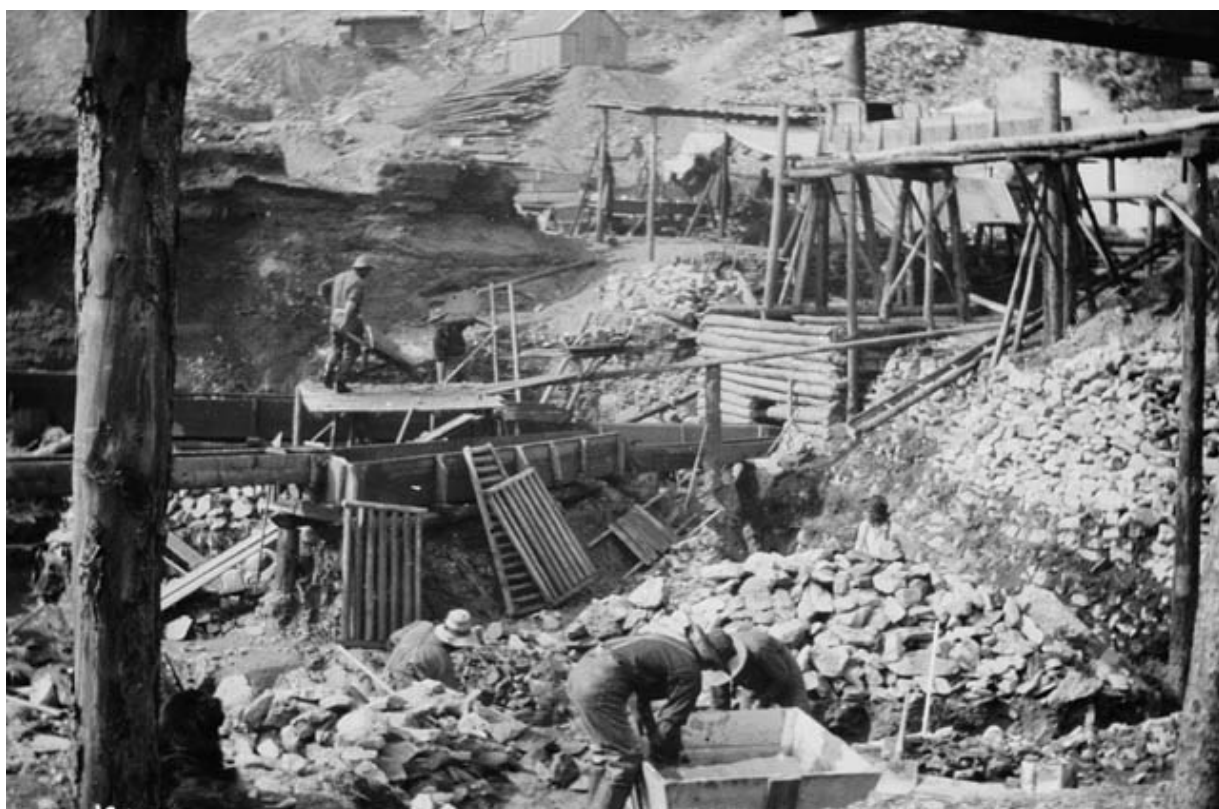
| | |
|--|----|
| Úvod..... | 9 |
| 1 Technologie abrazivního vodního paprsku | 12 |
| 1.1 Kapalinový paprsek | 12 |
| 1.1.1 Čistý vodní paprsek | 12 |
| 1.1.2 Vodní abrazivní paprsek..... | 12 |
| 1.2 Abrazivo..... | 14 |
| 1.3 Základní rovnice proudění tekutin..... | 15 |
| 1.4 Technické parametry a fyzikální veličiny vodního abrazivního paprsku | 17 |
| 2 Vibrodiagnostika | 22 |
| 2.1 Snímače..... | 22 |
| 2.1.1 Snímače přiblížení | 22 |
| 2.1.2 Snímače rychlosti | 22 |
| 2.1.3 Akcelerometry | 23 |
| 2.1.4 Uchycení a umístění snímačů | 25 |
| 2.2 Vyhodnocování signálu vibrací pomocí FFT | 26 |
| 3 Shrnutí literární rešerše | 28 |
| 3.1 Vymezení pojmů..... | 28 |
| 3.1.1 Akustická emise..... | 28 |
| 3.1.2 Vibrace | 28 |
| 3.2 Měření akustické emise na obrobku | 28 |
| 3.3 Porovnání akustické emise obrobku a vertikální síly | 30 |
| 3.4 Měření vibrací na obrobku..... | 31 |
| 3.5 Monitoring pomocí akustické emise..... | 34 |
| 3.6 Měření vibrací na vodním abrazivním paprsku | 36 |
| 4 Experimentální část..... | 39 |

| | | |
|-------|---|----|
| 4.1 | Záznam měření: | 39 |
| 4.2 | Zpracování signálu:..... | 40 |
| 4.3 | Měření vibrací:..... | 43 |
| 4.3.1 | Měření vibrací při vrtání různých druhů materiálů | 45 |
| 4.3.2 | Měření vibrací při různých hmotnostních průtocích abraziva..... | 47 |
| 4.3.3 | Měření vibrací při použití různých druhů abraziva | 48 |
| 4.3.4 | Shrnutí měření | 49 |
| | Závěr..... | 51 |
| | Bibliografie..... | 53 |
| | Seznam použitých fyzikálních veličin..... | 57 |
| | Seznam obrázků | 58 |
| | Seznam tabulek | 59 |
| | Seznam příloh..... | 59 |

Úvod

Aplikovaná fyzika je bezpochyby jedním ze zdrojů pokroku v mnoha technických disciplínách, mj. i v oblasti porušování materiálů. Technici neustále hledají nové metody v této oblasti, jednak kvůli novým těžkoobrobitelným materiálům, ale také z důvodu ekologického a ekonomického. Výzkumy fyziků přinesly nové technologie, nové přístupy, nová vylepšení techniky, která dnes souhrnně označujeme jako progresivní technologie porušování materiálů. V dnešní době se tyto technologie, ať už souběžně s konvenčními, nebo místo nich, více uplatňují. Mezi progresivní technologie porušování materiálů patří mj. elektroerozivní obrábění, elektrochemické obrábění, ultrazvukové obrábění, řezání laserem, plasmou a kapalinovým paprskem. Ve své práci se budu zabývat jednou z nejstarších progresivních technologií – kapalinovým paprskem.

Použití vody k rozrušování materiálu sahá až do druhé poloviny 19. st., kdy se začal používat proud nízkotlaké vody v Kalifornii k těžbě zlata. [1]



Obrázek 0.1 Těžba zlata na potoce Bonzana Creek, 1889. [2]

A. P. Chausov v roce 1867 rozvinul metodu těžby zlata pomocí kapalinového zařízení. Toto zařízení následně používali v Sovětském svazu pro dolování zlata kolem jezera Bajkal. [3] Od třicátých let dvacátého století se začala v Sovětském Svazu používat metoda

těžby v hlubinných uhelných dolech pomocí vodního paprsku, kdy nová metoda byla pro těžbu výhodnější než obvykle metody dobývání. Další země jako Japonsko, Nový Zéland, Čína a Kanada začaly novou metodu dobývání uhlí brzy používat. [4] V roce 1933 společnost Paper Patents Company ve Wisconsinu vytvořila stroj, který měřil, řezal a navíjel papír. Nový stroj používal k řezání papíru vodní paprsek o nízkém tlaku. V roce 1956 vyvinul Carl Johnson z Durox International v Lucembursku metodu řezání plastů pomocí vysokotlakého vodního paprsku. [5] Začátkem druhé poloviny 20. st. se používal vodní paprsek při těžbě uranu, jelikož eliminoval riziko záření spojené s těžbou rudy. V této době experimentoval s vodním paprskem také Dr. Norman Franz. Jako první studoval velmi vysoký tlak- UHP (UHP je tlak větší jak 206,8 MPa) a je považován za otce vodního paprsku. [1] Paprsek používal v dřevařském průmyslu k řezání tlustých stromů. Zásadní změna nastala na konci 70. let 20. st., kdy Dr. Mohamed Hashish zavedl na vodním paprsku techniku přisávání abraziva. Tím nastala doba globálního uplatnění této technologie pro řezání nejrůznějších materiálů. Na začátku 80. let se poprvé použil kapalinový paprsek k řezání betonu, železa a skla. Také první průmyslové zařízení k řezání skla využívající vodní paprsek se vyrobilo již v roce 1983. [6]

Hlavní výhody vodního paprsku jsou skutečnosti, že paprsek řezaný materiál tepelně neovlivňuje a můžeme bez výměny nástroje řezat téměř jakýkoliv materiál. Další nezanedbatelné výhody jsou vysoká energetická účinnost při vlastním řezání až 80%. V řezaném materiálu nedochází ke vzniku mikrotrhlin a zbytkových napětí. Vodní abrazivní paprsek je velmi šetrný k životnímu prostředí a abrazivo z kalu nádrže je možné až ze 70% recyklovat. Nevýhodou je, že řezáme vodou, takže můžeme předpokládat, že některé materiály budou rezivět, nebo se mohou objevit materiály, které nesmí přijít vůbec do styku s mokřím prostředím. [7]

I v dnešní době jde vývoj progresivních technologií porušování materiálů stále dál. Témata kolem inovace vodního abrazivního paprsku nejsou vyčerpaná. Můžeme hledat další vylepšení, aplikace a inovace jednotlivých částí. Důležité je si uvědomit, že i rozvoj materiálu se posunul. Řezné a obráběcí nástroje musí zvládnout zpracovat nové, moderní materiály. Dnešní systémy vodního abrazivního paprsku umožňují naklápět řeznou hlavici, což umožňuje řezání pod úhlem. Jednak se naklopením hlavice eliminuje úkos, ale hlavně naklápění hlavice umožňuje 3D řez a s tím spojené 3D frézování. Výhodami frézování vodním abrazivním paprskem jsou znovu minimální tepelná ovlivnění materiálu a flexibilita procesu, jelikož lze bez změny nástroje frézovat různé materiály a to i zároveň na jednom stole. Širšímu uplatnění zatím brání nedostatek vhodných řešení monitorování

samotného procesu, které by umožnilo přesné řízení frézování. Měření buď vibrací hlavice, obrobku, nebo monitorování vertikální řezné síly sice lze používat jako jeden z parametrů monitorování, např. zjišťování hloubky řezu, nicméně výsledky těchto měření neposkytují zpravidla dostatečně přesné informace pro online řízení celého procesu. Obecně během řezání materiálu lze pozorovat mnoho různých signálů, které jsou nositeli informací o technologickém procesu, ale jejich výpovědní hodnota je zatím stále příliš neurčitá a v technické praxi se zatím žádný s popisovaných monitorovacích systémů neujal [8], [9], [10].

Tato bakalářská práce se zabývá měřením vibrací, přesněji vibrací řezné hlavice. Mým úkolem bylo na základě provedených měření vyhodnotit možné souvislosti mezi technologickými parametry vodního abrazivního paprsku a vibracemi hlavice. V první kapitole se práce zabývá obecně vodním abrazivním paprskem a fyzikálním popisem dynamiky kapalin. Druhým teoretickým základem je problematika měření vibrací mechanických zařízení jako diagnostického nástroje případných poruch a správnosti chodu zařízení. Práce rozebírá vibrodiagnostiku jako samotnou disciplínu a poté popisuje akcelerometry, jako důležité členy měření vibrací. Ve vědecké literatuře lze dohledat řadu publikací pojednávajících o měření vibrací – ať už obecně, nebo přímo na abrazivním vodním paprsku. Vybral jsem několik z nich a ty jsem podrobně prostudoval. V práci předkládám výsledky své analýzy a hodnotím tvrzení autorů z pohledu svých vlastních poznatků. Zamýšlím se nad tvrzeními, která by mohla být pro měření vibrací na řezné hlavici důležitá. Další část je věnována experimentu. Popisuji návrh experimentu, úskalí při jeho provádění a samozřejmě průběh. Poté se věnuji jeho vyhodnocení a rozebírám, jaké závěry z toho pro nás plynou.

1 Technologie abrazivního vodního paprsku

1.1 Kapalinový paprsek

Kapalinový paprsek řadíme mezi progresivní technologie porušování materiálů. Z vysokotlakého čerpadla je kapalina přiváděna k trysce o malém průměru, kde vzniká proud kapaliny o vysoké kinetické energii. Paprsek o malém průměru při dopadu na pevnou překážku soustředí velké množství energie na malou plochu a tím porušuje vazby mezi částicemi. Nejpoužívanější kapalinou je voda, a to jednak z hlediska ekonomického, protože je levná a dobře dostupná, a také kvůli jejím výhodným fyzikálním vlastnostem jako je hustota, minimální stlačitelnost a viskozita. Kapalinový paprsek můžeme rozdělit podle jeho bližších specifikací:

1.1.1 Čistý vodní paprsek

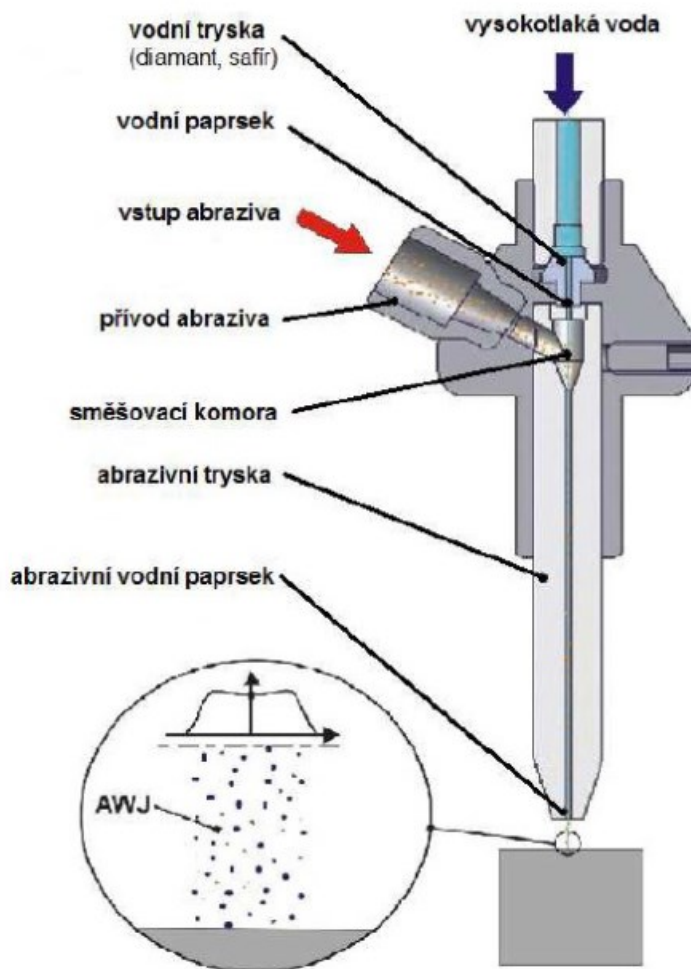
Tohle zařízení se dnes používá hlavně pro řezání měkkých a tenkých materiálů, jako jsou kompozity, kevlar, dřevo, eternit a různá plátna a tkaniny. Tlak vodního paprsku se pohybuje v rozmezí 50 – 450 MPa. Vnitřní průměr trysky čistého vodního paprsku bývá 0,1 – 1,5 mm. Rychlost kapaliny je potom na výstupu 300 až 1200 m/s. [11] Tlak kapaliny se obvykle reguluje podle výrobního postupu a druhu řezaného materiálu. Pro zvýšení účinnosti může být kontinuální paprsek změněn na pulzní. [12]

1.1.2 Vodní abrazivní paprsek

U tlustších a pevnějších materiálů (slitiny titanu, keramika, ocel, tvrzená skla, dlažba aj.) je čistý vodní paprsek nedostačující, proto se používá technologie přidávání abraziva do vody. Průtok abraziva je zpravidla 200 – 300 g/min. Na rozdíl od čistého vodního paprsku je erozní síla vodního abrazivního paprsku 1000x větší. Tlak vody se pohybuje mezi 300 – 600 MPa. Paprsek teoreticky dosahuje rychlosti 600 až 1200 m/s. Vnitřní průměr usměrňovací trubice je obvykle 1 – 2,5 mm. [13]. Technologie přidávání abraziva se ustálila na dva základní typy. Podle toho, kde a jak je voda s abrazivem smíchána:

a) Vodní abrazivní paprsek - pomocí Venturiho efektu [14] (hydrodynamický paradox) jsou částice abraziva přisávány podtlakem za vodní tryskou ve směšovací komoře. Dále prochází směs abraziva a vody usměrňovací trubicí, která částečně fokusuje paprsek. [13]

b) Abrazivní suspenzní paprsek – u této technologie se voda směšuje s abrazivem již před tryskou. [13]

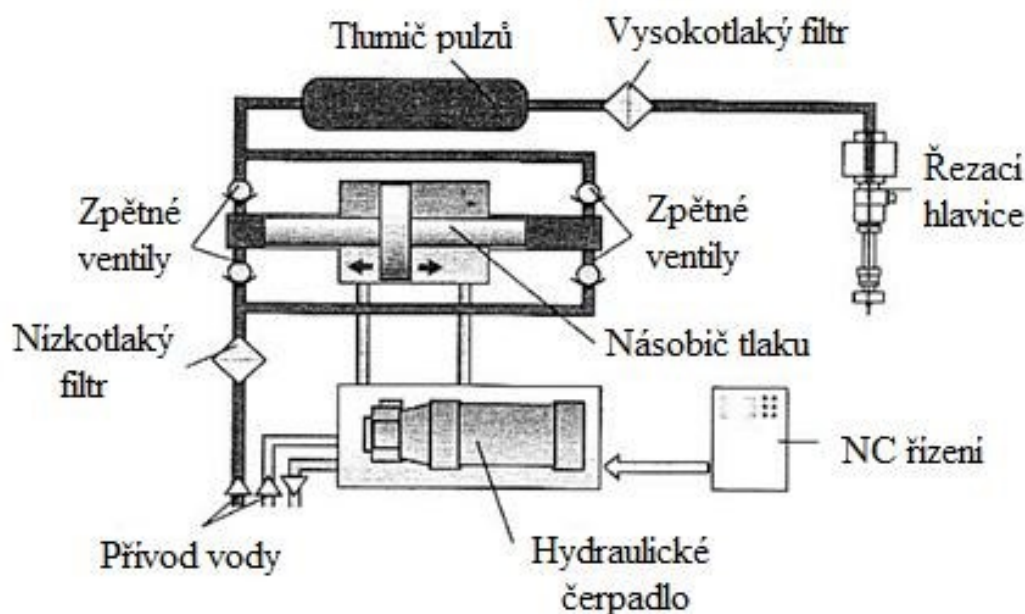


Obrázek 1.1 Schéma řezné hlavice vodního abrazivního paprsku s přísáváním [11]

Dále se budu zabývat vodním abrazivním paprskem prvního typu.

Cesta proudu vody začíná ve speciálním vysokotlakém čerpadle, kam je voda přivedena přes filtrační jednotku. V primárním okruhu čerpadla je vysokotlaké olejové čerpadlo, které pohání hydraulický násobič tlaku (multiplikátor) pomocí velkého pístu. Olej je tlačěn přes uzavírací ventily, proto působí před i za píst střídavě a pohání tak v sekundárním okruhu dva písty o menším průměru. V sekundárním okruhu již tedy máme vodu o pracovním tlaku až 650 MPa [15]. Velikost zesíleného tlaku závisí na poměru velikosti průměru velkého pístu k průměru obou menších pístů. Sekundární okruh obsahuje zpětné ventily, dále vysokotlaký akumulátor, který tlumí rázy vody vznikající v komorách obou pístů o menším průměru. Tak zajistíme vodu požadovaného konstantního tlaku vedenou vysokotlakými kapilárami do řezné hlavice zakončené tryskou. Do řezné hlavice ústí hned za tryskou také hadice, přísávající abrazivo. Jeho přísun je regulován pomocí

ventilu. U moderních zařízení je abrazivo pomocí přetlaku vzduchu dopravováno ze zásobníku do malé násypky umístěné nad řezacím systémem. [11]



Obrázek 1.2 Schéma principu řezání vodním abrazivním paprskem. [7]

Paprsek letí z trubice vzduchem až na pevnou látku, kterou porušuje. Pohybuje se až několikanásobnou rychlostí zvuku, takže můžeme hovořit, že se chová z hlediska účinku jako pevná látka. Z fyzikálního hlediska můžeme jev, kdy došlo k přeměně tlakové energie na dynamickou, vysvětlit Bernoulliho rovnicí (3). Kinetická energie paprsku je přenášena do materiálu, kde za současného působení kavitační koroze porušuje vazby mezi částicemi materiálu. Kavitační koroze je jev, při kterém vznikají v kapalině dutiny (bubliny) vyplněné párou kapaliny. [12] Při zániku bublin nastávají v kapalině rázové vlny a dochází k destrukci částic materiálu z povrchu [16]. U abrazivního vodního paprsku navíc dochází k plasticko-elastické srážce s pevnou látkou, která je porušována. Část kinetické energie abraziva se přemění na tlakovou energii, která deformuje materiál, na potenciální energii pružnosti a na energii, která destruuje vazby. Určitý díl kinetické energie se přenesou na uvolněné částice materiálu a ty potom mohou dále působit destrukce ve spodních vrstvách obrobku. [12]

1.2 Abrazivo

Jak bylo uvedeno výše, do čistého vodního paprsku se přidává abrazivo z důvodu zvýšení výkonu paprsku. Abrazivo je přidáváno v různých formách (prášku, mikročástic křemičitého písku, drobných syntetických granulátů, ocelových kuliček nebo drtě). Abrazivo může být přírodního původu nebo synteticky vyrobené. Materiály, které lze k

tomuto účelu použít jsou granát, olivín, korund, křemičitý písek, ocelová drť, sůl, cukr, diamantový prášek, drť skořápek vlašských ořechů apod. Nejčastěji používaným abrazivem je díky své nízké ceně a vysoké produktivitě granát. MESH je jednotka pro zrnitost abrazivních částic. Číslo udává počet ok síta na délce jednoho palce (1 *palec* = 2,54 cm). [11]

1.3 Základní rovnice proudění tekutin

Proudění tekutin je velmi komplikovaný fyzikální problém, který v obecné rovině zpravidla není analyticky řešitelný, jednotlivé praktické problémy lze však poměrně často uspokojivě řešit na základě zjednodušujících předpokladů [17]. V této kapitole připomenu zjednodušené rovnice, které je možno v případě vodního paprsku použít.

Rovnice kontinuity pro jednorozměrné proudění stlačitelné tekutiny udává, že hmotnostní průtok tekutiny při ustáleném proudění zůstává konstantní.

$$Q_m = \rho S v \quad (1)$$

Q_m je hmotnostní průtok, který udává hmotnost tekutiny proteklé za jednotku času.

Pro nestlačitelné kapaliny je hustota konstantní, rovnice (1) se zjednoduší na tvar (2).

$$Q_v = S v = \text{konst.} \quad (2)$$

Q_v udává objem kapaliny proteklý za jednotku času.

Z těchto vztahů nám vychází, že ke změně rychlosti proudění dochází s měnícím se průměrem trubice, ale průtok zůstává konstantní. [18]

Dalším důležitým vztahem je zákon zachování energie, který je pro proudící nestlačitelnou kapalinu vyjádřen Bernoulliho rovnicí:

$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + g h_1 = \frac{v_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + g h_2 + E_z \quad (3)$$

Členy v rovnici nám udávají na pravé straně kinetickou energii, potenciální energii a potenciální energii kapaliny v tíhovém poli přepočtenou na 1 kg proudící kapaliny. Poslední člen je energie, o kterou přijdeme vlivem ztrát, opět přepočtená na jednotkovou hmotnost proudící kapaliny. Z rovnice nám vyplývá závislost tlaku a rychlosti proudění kapaliny. S rostoucím tlakem klesá rychlost proudění. Takže s menším průřezem například

trysky se rychlost zvětší, ale tlak se zmenší. Tento jev nazýváme právě Venturiho efekt [14]. Vlivem velmi vysoké rychlosti se tlak sníží na tolik, že vznikne vakuum. Využití tohoto efektu je v řezné hlavici při přisávání abraziva, nebo u rozprašovačů, lakýrnických pistolí, karburátorů apod. [17]

Rychlost kapaliny nám také ovlivní ztrátová energie. Tu můžeme vyjádřit pomocí tzv. ztrátové výšky tj. energie, která se v průběhu popisovaných dějů změní na energii jiného druhu:

$$E_z = gh_z \quad (4)$$

Ztrátovou výšku ovlivňují třecí a místní ztráty. Třecí ztráty jsou ovlivněny mnoha faktory: součinitelem tření, délkou a průměrem potrubí a rychlostí proudění. Místní ztráty způsobuje průchod kapaliny přes kolena, různá rozšíření a zúžení průřezu. Velikost místních ztrát je pro jednotlivé prvky stanovena experimentálně. [17]

$$h_z = \left(\lambda \frac{l}{d} + \Sigma \zeta \right) \frac{v^2}{2g} \quad (5)$$

Součinitel ztráty třením se stanovuje relativně obtížně a závisí na několika faktorech, jako je povrch potrubí, průtok, průřez trubice, hustota a viskozita kapaliny. V případě vodního abrazivního paprsku se v prvním přiblížení předpokládá, že potrubí je hydraulicky hladké. [17]

Z Bernoulliho rovnice a rovnice kontinuity lze odvodit Torricelliho vzorec. Ten udává rychlost výtoku kapaliny v závislosti na poklesu tlaku $(p_1 - p_0)$ a rozdílu hladin h . [18].

$$v = \sqrt{2 \left(gh + \frac{p_1 - p_0}{\rho} \right)} \quad (6)$$

Rovnice pro rychlost výtoku abrazivního vodního paprsku je sice nad rámec základních rovnic, ale je důležitá. Uvádím rovnici, kterou odvodil dr. Hashish [19].

$$v_a = \eta v_0 \frac{m_w}{m_w + m_a} \quad (7)$$

Celou problematiku teoretického modelu kapalinového paprsku včetně této rovnice uvádí profesor Hlaváč ve své práci. [20]

Tyto rovnice jsou bez pochyby důležité k pochopení fyzikálního základu vodního abrazivního paprsku a s tím náležejících souvislostí. Při práci s paprskem v laboratorních podmínkách a při experimentech je důležité mít obecné rovnice v podvědomí, pro případné stručné výpočty a rychlé ověření myšlenek.

1.4 Technické parametry a fyzikální veličiny vodního abrazivního paprsku

Vhodná kombinace veličin a parametrů kapalinového paprsku nám zajistí efektivní aplikaci v praxi. Fyzikální veličiny spojujeme hlavně s teoretickým popisem, v praxi mohou ovšem být limitovány příslušným technickým zařízením. Proto se může stát, že původně fyzikální veličiny mohou získávat povahu spíše technických parametrů. Odlišnost těchto dvou termínů je v tom, že veličiny považujeme za fyzikální tehdy, když je jejich změna spojitá v oboru technicky realizovatelných hodnot. Pokud je změna v oboru technické realizace spíše diskrétní, považujeme ji za technický parametr. Problematiku můžeme vyložit i tak, že fyzikální veličiny vodního abrazivního paprsku jsou považovány při technické realizaci za technické parametry procesu. [21]

Průměr usměrňovací trubice:

Za provozu ho není možné měnit, proto ze své podstaty patří k technickým parametrům. Do teoretických modelů může být zahrnut jako fyzikální veličina. Průměr usměrňovací trubice má vliv na šířku řezu. Spolu s průměrem kapalinové trysky, střední zrnitostí abraziva a hmotnostním průtokem má zásadní význam pro jakost vytvořeného povrchu a účinnost paprsku. [21] Průměr usměrňovací trubice by mohl působit na vibrace řezné hlavy, protože zásadně ovlivňuje podmínky směšování a tedy i nárazy jednotlivých zrn abraziva na vnitřní stěny usměrňovací trubice. Podobné téma je řešeno v článku [22].

Délka usměrňovací trubice:

Stejně jako u průměru usměrňovací trubice je i délka technický parametr, který není možné za provozu měnit. Ovlivňuje kvalitu vytvořeného povrchu. Opět lze ve výpočtovém modelu tento parametr použít jako spojitou fyzikální veličinu. V praxi však není použitelný pro účely regulace či řízení. [21] Stejně jako průměr, i délka usměrňovací trubice by mohla ovlivnit vibrace řezné hlavy.

Vzdálenost výstupního ústí usměrňovací trubice od povrchu porušovaného materiálu:

Má-li stroj pohybové zařízení uzpůsobeno tak, že je možné tuto veličinu definovaným způsobem měnit, potom je to vhodná veličina pro řízení procesu obrábění. Také výrazně kvalitativně i kvantitativně ovlivňuje působení vodního paprsku na porušovaný materiál. Je to tedy fyzikální veličina, která dosahuje výrazného maxima účinku vodního paprsku. Pro vodní abrazivní paprsek leží toto maximum v blízkosti výstupního ústí usměrňovací trubice. Na většině průmyslových zařízení je vzdálenost výstupního ústí usměrňovací trubice od povrchu porušovaného materiálu sice nastavitelná, ale během procesu neměnná, takže se potom jedná o technický parametr. [21] Jestli tento technický parametr může primárně ovlivnit vibrace, nejsem zcela přesvědčený. Sekundárně zpětné nárazy vody a abraziva mohou ovlivnit vibrace.

Úhel dopadu paprsku vzhledem k normále povrchu materiálu:

Tento úhel je fyzikální veličina, která ovlivňuje sklon drážky vzhledem k normále povrchu porušovaného materiálu. Pokud se materiál neprořezává, ovlivňuje také hloubku dna drážky. Jejimi změnami můžeme provádět úpravu kolmosti stěn drážky při řezání. To je výhodné hlavně v zakřivených částech dráhy, kde v drážce působí na částice paprsku odstředivá síla. Samotné řízení úhlu je náročný technický problém, který vyžaduje zavedení matematických vztahů, kde je sklon stěn drážky závislý na technických parametrech vodního paprsku, obráběcích trajektoriích apod. Náročnost problému ztěžuje také skutečnost, že paprsek při průchodu obrobkem postupně ztrácí koherenci, ovšem tato ztráta koherence se těžko definuje. Další komplikací je obtížná předvídatelnost vlivu nehomogenit porušovaného materiálu na odchýlení pohyblivého nástroje z původního směru. [21]

Průměr trysky:

Z technických důvodů jsou vyráběny trysky pouze o určitých průměrech. Také není možné z technického hlediska za provozu trysku měnit. Navíc mezi průměrem trysky, průměrem usměrňovací trubice a střední velikostí částic abraziva je nutno dodržet určité poměry. Z těchto důvodů tryska je fyzikální veličina, která nabývá v praxi pouze diskrétních hodnot, proto má charakter technického parametru. Jako technický parametr ale průměr trysky neumožňuje on-line ovlivňování technologického procesu a není tedy využitelný pro řízení procesu. Ve výpočtových modelech pro stanovení porušení materiálu vodním paprskem je ovšem spojitou veličinou. [21]

Tlak kapaliny před tryskou:

Významně ovlivňuje výkon i kvalitu vodního paprsku. Jestliže ostatní technické parametry jsou ve svých změnách výrazně limitovány, nebo jsou konstantní, můžeme tuto veličinu z technického hlediska považovat za dostačující k řízení procesu, a to jak z pohledu kvantitativního, tak i kvalitativního. Tlak kapaliny před tryskou je tedy fyzikální veličina. Protože existují dostatečně přesné snímače tlaku i aktivní členy ovládající stavové veličiny čerpadel, je vhodná k regulaci. Buď se může udržovat konstantní hodnota tlaku vody, nebo se může hodnota plynule změnit podle technologických potřeb. [21] Samozřejmě, že tlak kapaliny před tryskou by ze své podstaty mohl nějakým způsobem ovlivnit vibrace na řezné hlavici. Avšak při experimentech se používala vždy konstantní hodnota tlaku.

Rychlost posuvu paprsku po povrchu porušovaného materiálu:

Podobně jako tlak můžeme tuto fyzikální veličinu použít jako technický parametr umožňující například regulaci hloubky porušení materiálu. Na kvalitu i kvantitu porušení materiálu má výrazný vliv. Technologicky je možné konstruovat pohony i snímače zajišťující definovaný pohyb materiálu resp. pohyb řezné hlavice. Buď se může udržovat konstantní hodnota rychlosti posuvu, nebo je možno ji plynule měnit podle potřeb technologického průběhu řezání. [21] Zde by šlo hledat původce vibrací ve změnách směru a rozjezdu posuvu, protože se nejedná o plynulý pohyb/rozjezd.

Množství abrazivního materiálu přidávaného do paprsku:

Touto fyzikální veličinou můžeme rovněž působit na hloubku porušení materiálu i kvalitu vzniklého povrchu. V praxi však většinou používáme pouze jedno nastavení, což znamená, že se jedná o technický parametr. Ovšem existují zařízení, která umožňují za provozu do paprsku plynule a definovaně dávkovat abrazivo. Do teoretického modelu je tento parametr v návaznosti na ostatní veličiny zaveden jako fyzikální veličina. Je třeba pamatovat na skutečnost, že pro dosažení porušení materiálu je nutno použít konkrétní kombinaci hodnot fyzikálních veličin a technických parametrů, příslušné hodnoty není možno libovolně kombinovat. [21] Množství abrazivního materiálu výrazně mění poměr vody a abraziva. Jednak s větším množstvím abraziva se zvětší frekvence nárazů na stěnu řezné hlavice. Nárazy abraziva mohou být přímo uvnitř hlavice, ale také zpětně odražené abrazivo z obrobku a nádrže může narážet na řeznou hlavici a tím tak ovlivnit vibrace.

Střední velikost zrna abrazivního materiálu:

Ovlivňuje hloubku porušení materiálu a má také značný vliv na jakost vzniklého povrchu. Střední zrnitost bereme jako technický parametr, protože i tato veličina je v praxi limitovaná parametry materiálů dostupných na trhu, proto nabývá diskrétních hodnot určitých řad. Z technologického hlediska není možno tento parametr spojitě měnit. Do výpočtových modelů je možno tento parametr zahrnout jako fyzikální veličinu. Střední zrnitost abraziva úzce souvisí s průměrem kapalinové trysky a průměrem usměrňovací trubice, protože při dané zrnitosti a optimální kombinaci obou průměrů existuje nejlépe vyhovující hmotnostní přítok abraziva do řezné hlavice, tak aby byla energie vody maximálně možně využita. [21] Střední velikost zrna by mohla ovlivňovat vibrace řezné hlavice.

Kvalita abrazivního materiálu:

Lze ji zahrnout do teoretického modelu v podobě nějaké empirické proměnné, tedy jako fyzikální veličinu, má však charakter více technického parametru, který spíše nelze řídit. Znatelně ovlivňuje výkon paprsku a kvalitu vytvořeného povrchu. Většinou je používán přírodní materiál (např. granát, olivín) s danými vlastnostmi a z ekonomického hlediska není možné tyto vlastnosti zkvalitňovat náročnými technologickými postupy. Používá se proto v přírodní formě, pouze pročištěný a vytríděný. Bez odstranění vnitřních napětí a defektů, dochází ke značnému poškozování abrazivních částic v procesu vzniku i působení vodního abrazivního paprsku. Účinnost paprsku a kvalita vzniklého povrchu jsou dány mírou poškození abrazivních částic. [21]

Na základě výše uvedeného výpisu fyzikálních veličin, resp. technických parametrů lze vybrat soubor veličin a parametrů zvláště vhodných pro řízení technologie kapalinového paprsku. V rámci zachování pořadí se jedná o: vzdálenost výstupního ústí usměrňovací trubice od povrchu porušovaného materiálu, úhel dopadu paprsku, tlak kapaliny před tryskou, rychlost posuvu paprsku a množství abrazivního materiálu přidávaného do paprsku. [21] Některé z těchto fyzikálních veličin, resp. technických parametrů se mohou na vibracích řezné hlavice projevit přímo, jiné ovlivňují kvalitu řezu a tedy i vlastnosti obrobku, což by se mohlo projevit na vibracích druhotně.

Vibrace na řezné hlavici mohou být způsobeny celou řadou okolností. Úplně základní původce vibrací může být rameno, na kterém je řezná hlavice připevněna. Rameno není zcela tuhá statická součást stroje a při situacích jako je posuv, změna pracovního tlaku,

resp. částečná jemná pulzace tlaku, přerušení proudění vody mohou být generovány vibrace. Ty mohou být také generovány díky vodním vlnám v nádrži. Přes obrobek pomocí paprsku by se mohly vibrace z nádrže přenést zpětně na řeznou hlavici. To znamená, že by vibrace mohl ovlivňovat i druh materiálu, ze kterého je obrobek vyroben. Stejně tak i stříkající voda, která nazpět naráží na hlavici, může způsobit vibrace. Jedním z možných zdrojů vibrací je i množství abrazivního materiálu přidávaného do paprsku. Abrazivo je nasáváno do řezné hlavice a mohlo by tak narážet do protilehlé strany uvnitř hlavice oproti ústí vstupu abraziva. Abrazivo by mohlo mít vliv na vibrace i z hlediska střední velikosti zrna. Další možný činitel vibrací je i délka a průměr usměřňovací trubice. Tyto dva technické parametry mohou ovlivnit spektrum vibrací na řezné hlavici.

2 Vibrodiagnostika

Jedna z nejpoužívanějších metod bezmontážní diagnostiky v technice je vibrodiagnostika. Hodí se použít na stroje, které při pohybu (rotaci, posunu, aj.) produkují vibrace (viz podkapitola 3.1.2). Primárně se touto metodou zjišťuje technický stav zařízení a díky tomu se dá předcházet poruchám, odstavení stroje a haváriím. Většinou se provádí preventivní vibrodiagnostické kontroly, kdy naplánovaná odstávka a popřípadě následná oprava ve výrobě nezpůsobí takové škody, které by vznikly při nečekané odstávce stroje kvůli poruše. Naměřená data se analyzují a vhodnými metody vyhodnocují. [23]

2.1 Snímače

Snímače slouží k převodu mechanického kmitání na elektrický signál. Ten bývá dále zesilovaný vhodným elektronickým prvkem, zpracovaný převodníkem a výsledná data jsou analyzována. Pro každý technický problém, kdy je třeba měřit vibrace, je nutno vybírat typ snímače, který se pro tuto činnost nejlépe hodí. Snímače se od sebe liší např.: dynamickým a frekvenčním rozsahem, hmotností, rezonančními vlastnostmi, citlivostí atd. [23]

Snímače vibrací mohou být rozděleny na tři kategorie podle veličiny, která je na výstupu snímače. Jedna kategorie jsou snímače výchylky, resp. přiblížení, druhá jsou snímače rychlosti (velometry) a poslední jsou snímače zrychlení (akcelerometry). Každý senzor se potom hodí na určité provozní podmínky, takže je nejlepší vždy aplikovat snímač na specifickou práci. [24]

2.1.1 Snímače přiblížení

Tyhle snímače jsou vhodné k měření hřídelů. Princip těchto snímačů je založen na bezdotykovém měření vířivých proudů. V praxi se měří dvěma snímači, které jsou proti sobě potočené o 90°. Tyto snímače bývají citlivé na parazitní vlivy, např. vnější elektromagnetická pole. [24] Pro měření vibrací na řezné hlavici kapalinového paprsku nejsou vhodné už z jejich podstaty.

2.1.2 Snímače rychlosti

Tyto snímače pracují na principu měření indukovaného napětí. Magnetické pole vzniká díky vzájemnému pohybu seismické hmoty, která je tvořena permanentním magnetem, a cívky. Výhoda je, že k měření není třeba vnější elektrický zdroj. Lze

jednoduše měřit multimetrem napětí na cívce. [24] Kvůli malému frekvenčnímu rozsahu se k měření vibrací na řezné hlavici příliš nehodí.

2.1.3 Akcelerometry

Akcelerometry měří statické nebo dynamické zrychlení. Jsou vhodné pro měření odstředivých a setrvačných zrychlení a hojně se používají na určování pozice tělesa v moderní elektronice, jako jsou chytré telefony.

Dále je rozdělujeme podle fyzikálního principu, kterým akcelerometry převádí změnu pohybu na elektrický signál.

Piezorezistivní akcelerometry:

Síla, která působí na seismickou hmotu, mění objem piezorezistivního materiálu. Ten pak mění svůj měrný elektrický odpor, což je vyhodnocováno. Tento typ akcelerometrů je závislý na teplotě prostředí. Pro měření vibrací na řezací hlavici není moc vhodný. Hodí se spíše pro dlouhodobá měření, např. měření ohybu nosníku.

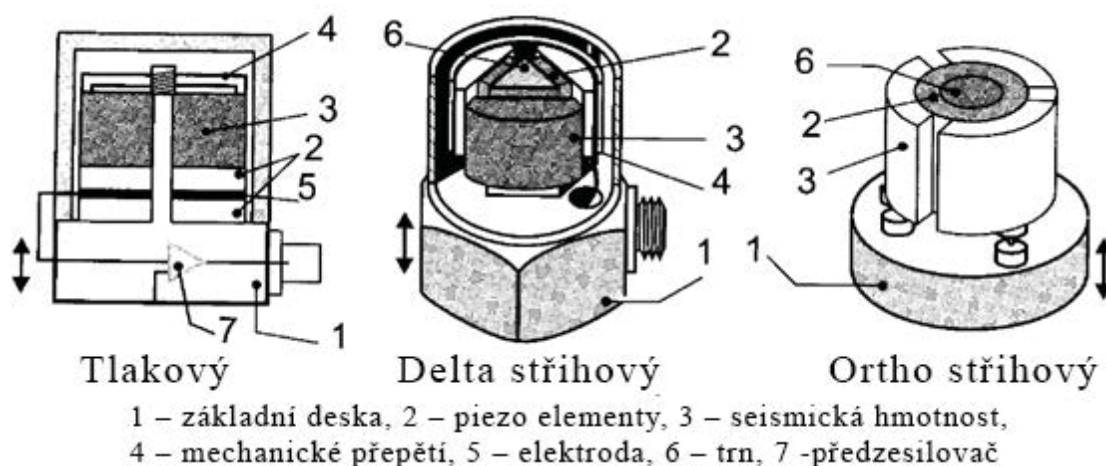
Akcelerometry s proměnnou kapacitou:

Fungují na principu kondenzátorů, které mění svoji kapacitu při pohybu seismické hmoty. Poloha hmoty je závislá na jejím zrychlení. Tyto akcelerometry se využívají k měření velmi malých a pomalých zrychlení. Z toho důvodu se k měření vibrací na řezné hlavici vodního abrazivního paprsku také nehodí.

Piezoelektrické akcelerometry:

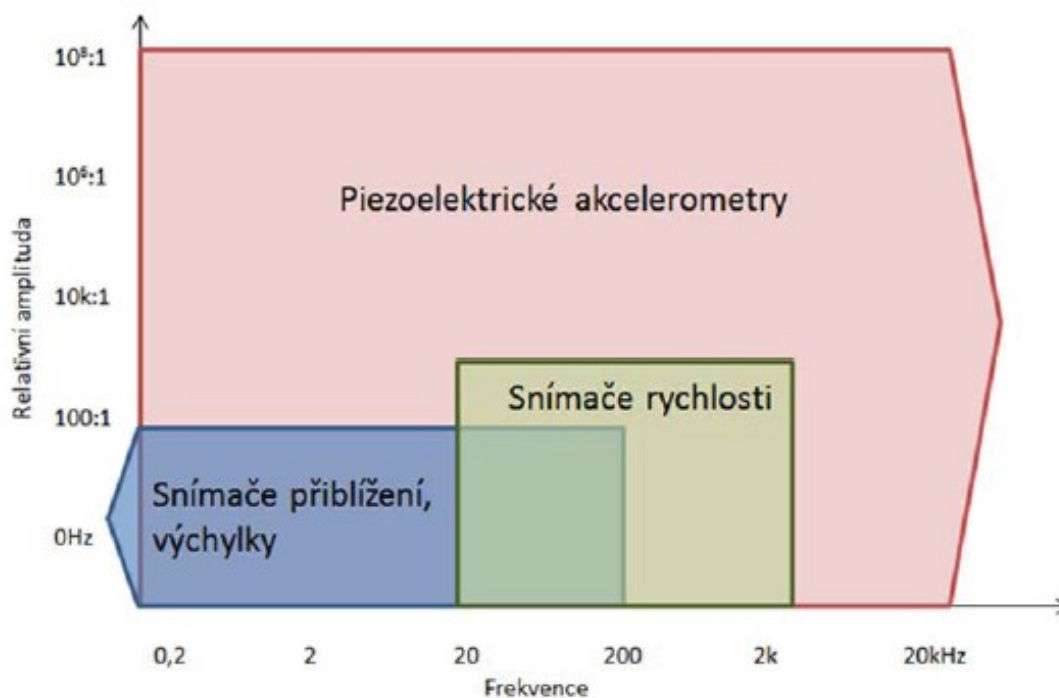
Technologie zachycení signálu využívá piezoelektrický materiál, který mechanické namáhání přemění na náboj. Náboj je přímo úměrný působící síle. Tento náboj se zpracovává dvojím způsobem, buď přímo externí elektronikou, nebo vnitřní elektronika převede náboj na napěťový výstup. Velkou výhodou je necitlivost na šum vnějšího magnetického pole. Tento typ akcelerometru je pro účel měření vibrací na řezací hlavici nejvýhodnější.

Akcelerometry můžeme dále dělit podle vnitřního uspořádání, viz obrázek 2.1.



Obrázek 2.1 Základní typy piezoelektrických akcelerometrů. [24]

Z následujícího obrázku 2.2 je zřejmé, že nejširší uplatnění mají piezoelektrické akcelerometry díky svému širokému frekvenčnímu rozsahu a rozmezí měřených relativních amplitud.



Obrázek 2.2 Pracovní rozsahy snímačů. [24]

Pro mé měření jsou v laboratoři k dispozici tři piezoelektrické akcelerometry PCB 352C33. Firma vznikla v roce 1967 a zabývá se piezoelektrickými senzory. Tento typ akcelerometru má citlivost 100 mV/g ($\pm 10\%$) a měří ve frekvenční oblasti od 0,5 do 10000 Hz ($\pm 5\%$). Akcelerometr obsahuje integrální nábojový zesilovač. [25]

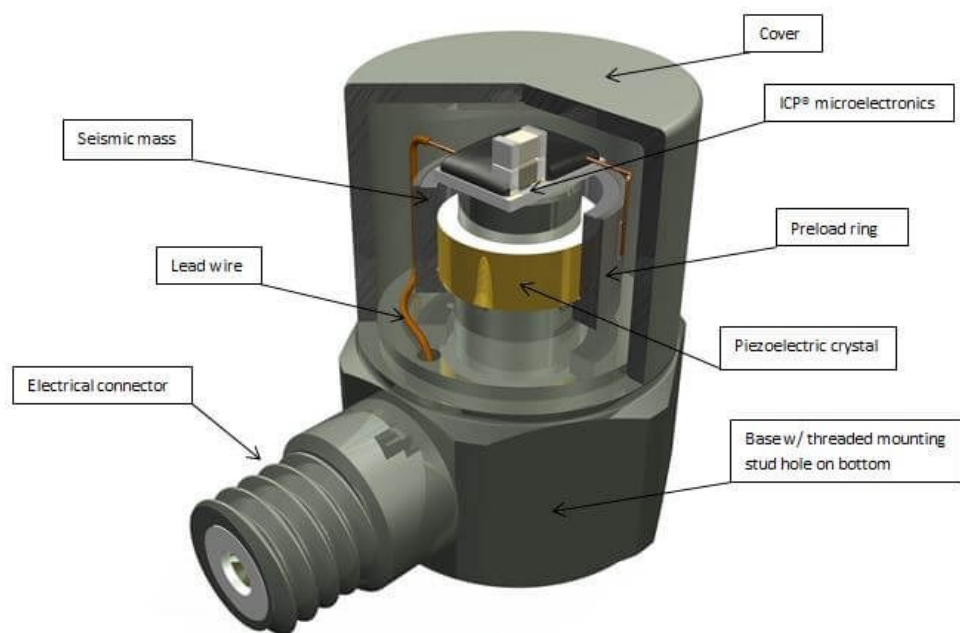
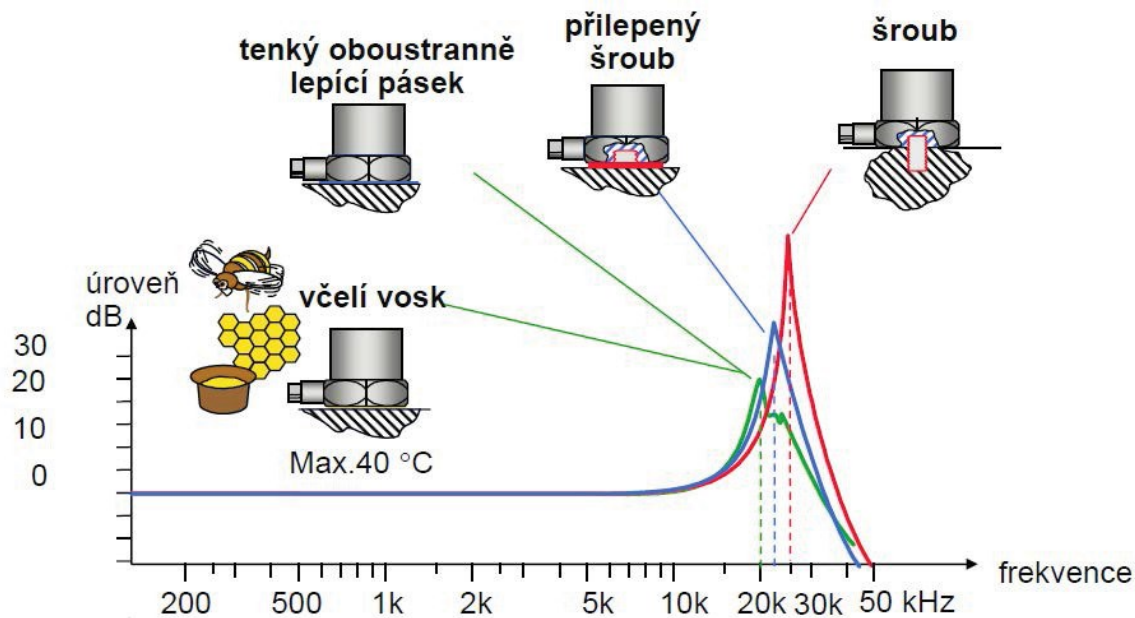


Figure 1: Typical ICP® Accelerometer

Obrázek 2.3. ICP akcelerometr [25]

2.1.4 Uchycení a umístění snímačů

Jeden z nejdůležitějších elementů měření je správné uchycení snímačů. Vliv způsobu uchycení ovlivňuje měření a jeho vliv je patrný z obrázku 2.4. [24]



Obrázek 2.4 Správné uchycení snímače a jeho vliv na úroveň signálu. [24]

Také správné umístění snímačů je pro nejpřesnější měření velmi důležité. V případě, že se nedodrží určité zásady, můžou se naměřit zkreslené hodnoty. To může

u vibrodiagnostiky vést ke špatnému určení technického stavu stroje, v případě měření fyzikálního procesu ke špatnému vyhodnocení probíhajících dějů. [23]

Místo, kde bude připevněn snímač, musí být vybráno tak, aby se signál mohl šířit přímo ze zdroje do senzoru. To znamená, že snímače se umísťují do nejkratší možné vzdálenosti od zdroje signálu, aby nedocházelo k jeho zeslabení. Je třeba se vyhýbat místům přechodu mezi materiály. [23]

Při měření technického stavu stroje je hlavní znalost měřeného zařízení, jaké konstrukční části stroj obsahuje a kde je máme hledat. Snímače se umísťují vždy na stejná místa, abychom zajistili možnost porovnání jednotlivých měření mezi sebou. Poruchy nemusí být orientovány v jednom směru, proto se provádí měření většinou ve třech směrech: horizontálním, vertikálním a axiálním. [23] To by platilo i u vodního abrazivního paprsku při měření vibrací na obrobku. Při měření na řezné hlavici se dají zvolit i jiná schémata.

2.2 Vyhodnocování signálu vibrací pomocí FFT

Naměřené signály vibrací při frekvenční analýze jsou většinou neperiodické. Perioda roste do nekonečna, frekvenční složky tedy nejsou celočíselnými násobky nějaké základní frekvence, ale frekvenční spektrum je spojitě. Pro výpočet frekvenčních složek je možné použít Fourierovu transformaci, definovanou integrály [26]:

- pro přímou transformaci

$$S(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (8)$$

- pro inverzní transformaci

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(f) e^{j2\pi ft} df \quad (9)$$

Funkce $S(f)$ je obecně komplexní a obsahuje informace o amplitudách a fázích všech harmonických frekvencí, které jsou obsaženy ve funkci $x(t)$. Fourierova transformace je dána spojitým integrálem. Časový signál vibrací lze však zaznamenat pouze v diskrétních hodnotách vzdálených o časový interval vzorkování Δt . Znamé jsou tedy pouze diskrétní hodnoty funkce $x(t)$ a integrály je třeba počítat numericky [26]:

$$S'(f) = \Delta t \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n\Delta t) e^{-j2\pi n f \Delta t} \quad (10)$$

V tomto případě nejsou informace o amplitudách a fázích všech frekvenčních složek přesné. Funkce $S'(f)$ popisuje přesně pouze složky s frekvencí nižší, než je hraniční maximální frekvence f_{max} , která souvisí s velikostí vzorkovacího intervalu Δt . Požadovaný součet přes nekonečný počet diskrétních hodnot také nelze splnit. Měření signálu v časové oblasti proběhne v konečném časovém intervalu T daným celkovou dobou měření a k použití je tedy pouze omezený počet diskrétních hodnot $x(n\Delta t)$, $n = 0, 1, 2 \dots N-1$, $N = \frac{T}{\Delta t}$. Získávají se tak diskrétní frekvenční složky s krokem Δf . Omezení počtu diskrétních hodnot $x(n\Delta t)$ vede ke vztahu [26]:

$$C(m\Delta f) = \Delta t \sum_{n=0}^{N-1} x(n\Delta t) e^{-j2\pi m \Delta f n \Delta t}, \quad (11)$$

$$\text{pro } m = 0, 1, 2, \dots, \frac{N}{2} - 1$$

Algoritmus pro efektivní výpočet diskrétní transformace se nazývá rychlá Fourierova transformace (FFT - zkratka skrývá anglická slova Fast Fourier Transformation). Použití FFT je omezeno na hodnoty N rovny mocnině čísla 2. Je to z důvodu rychlosti výpočtu, která je při frekvenční analýze ve většině případů důležitá. Počet hodnot frekvenčního spektra je poloviční vzhledem k počtu hodnot časového signálu, přičemž f_{max} je rovna polovině vzorkovací frekvence $f_{vz} = \frac{1}{\Delta t}$. Tato závislost se nazývá Shannonův teorém. Ten nám říká, že vzorkovací frekvence musí být alespoň dvakrát větší, než je frekvence nejvyšší harmonické složky, obsažené v měřeném signálu. V digitální FFT se tato skutečnost projeví tím, že jen $N/2$ hodnot funkce $C(m\Delta f)$ ve vztahu (11) je nezávislých. [26]

3 Shrnutí literární rešerše

3.1 Vymezení pojmů

V této kapitole je uvedeno pět z mého pohledu nejzajímavějších publikací, které se blíže zabývají problematikou vibrací, resp. akustickými emisemi kapalinového paprsku. Protože se v člancích objevují právě oba termíny, níže je definuji.

3.1.1 Akustická emise

Akustická emise je uvolnění energie mechanického vlnění, které vzniká v materiálu v důsledku plastické deformace, při narušení materiálu a konstrukcí (přítomností rázů či tření), při úniku kapalin nebo plynů držených pod tlakem apod. Akustická emise je vhodná pro online diagnostiku cyklicky zatěžovaných součástí. [27] Využití akustické emise v diagnostice je v rozmezí od 100 *kHz* až do 4 *MHz*. [28]

3.1.2 Vibrace

Jde vlastně o kmitání tělesa, tedy vychylování tělesa z určité rovnovážné polohy. Vibrace lze také chápat jako odezvu hmoty na působící sílu. [27] Využívání vibrací k diagnostice je v případě akcelerometrů v rozmezí od 0 *Hz* do 20 *kHz*. [28]

To znamená, že v člancích se jedná v závislosti na terminologii o měření v odlišných frekvenčních oblastech, avšak metody se mohou v určitých frekvenčních pásmech i výrazně překrývat. [28]

3.2 Měření akustické emise na obrobku

Acoustic emission energy transfer rate: A method for monitoring abrasive waterjet milling [8] (Rychlost přenosu energie akustických emisí: metoda monitorování obrábění abrazivním vodním paprskem).

Autoři: Amir Rabani, Iulian Marinescu, Dragos Axinte

Článek pojednává o technologii umožňující sledovat hloubku řezu při obrábění abrazivním vodním paprskem. Tento článek je založen na výzkumné práci [29] a vyvíjí metodu založenou na hustotě toku energie přijatých signálů akustické emise a nově zavedeném konceptu rychlosti přenosu energie. Vstupní energie, která způsobuje porušování obrobku, je monitorována pomocí snímače akustických emisí namontovaného

na cílový povrch obrobku, zatímco rychlost posuvu trysky se získává online z kódů os stroje. Rychlost přenosu energie, je nový pojem, který v sobě zahrnuje vstupní energii paprsku, plochu obroušené stopy a rychlosti posuvu paprsku. Tato veličina zůstává konstantní při konkrétním tlaku čerpadla a hmotnostním průtoku abraziva. Konstantní hodnoty tlaku čerpadla kontrolují pomocí tlakoměru připevněného těsně před trysku, hmotnostní průtok abraziva kontrolují během procesu řezu snímačem akustických emisí připevněným na řezné hlavici, respektive na usměrňovací trubici. Tím je pro daný tlak čerpadla a průtok abraziva akustická energie na obrobku konstantní. Zvýšení / snížení rychlosti posuvu paprsku vede k úměrnému snížení / zvýšení objemu odstraněného materiálu bez ovlivnění rychlosti přenosu energie. Ta je potom brána jako konstanta odezvy materiálu na parametry vodního abrazivního paprsku.

Výhodou navrhované metody monitorování spočívá v tom, že díky rychlosti přenosu energie lze upravovat rychlost posuvu paprsku tak, aby bylo možné udržovat požadovanou hloubku řezu. Tato metoda monitorování otevírá možnosti pro CNC frézování vodním abrazivním paprskem tak, aby mohly být vytvářeny složité řezy s minimálním zásahem obsluhy stroje.

Při frézování vodním abrazivním paprskem by akustické signály mohly být generovány z několika zdrojů. Jednak původcem mohou být elastické rázy abrazivních částic, porušování obrobku bez odstranění materiálu, tvorba trhlin, odstraňování materiálu a lom jednotlivých zrn.

Při experimentech autoři používají pětiosý vodní abrazivní paprsek Ormond. Vysokotlaké čerpadlo SL-V100D (UHP) poskytující maximální tlak 500 MPa. Abrazivo mají australský granát mesh 80. Řezná hlavice je osazena usměrňovací trubicí z karbidu o vnitřním průměru 1 mm v kombinaci s rubínovou tryskou o průměru 0,3 mm. Řezy provádí na deskách (7 – 100 x 70) mm z titanové slitiny (Ti6Al4V), protože tento materiál je konvenčními metodami obvykle obtížně obrobitelný.

Naměřené signály autoři analyzují přes programy LabVIEW a Matlab. Používají zajímavou techniku Welch. Pomocí metody Welch je signál rozdělen na navzájem se překrývající segmenty. Metoda odhaduje síly signálu na různých frekvencích, tedy jednotlivé spektrální hustoty. Tato metoda rovněž snižuje výpočetní zátěž, kterou obvykle doprovází jiné metody, jako je rychlá Fourierova transformace pro sledování v reálném čase. Účinnost navrhované metody monitorování byla prokázána a vyhodnocena porovnáním

sledované oblasti obrušovaných stop ve dvou případech: při změně rychlosti posuvu paprsku v krocích a při plynule měněné rychlosti proudění.

Zajímavost článku vidím hlavně v metodě zpracování dat. Velkou výhodou shledávám právě v tom, že pro online monitorování hloubky řezu při obrábění vodním abrazivním paprskem, je velmi důležité, aby bylo možné ihned zpracovat signál v reálném čase. Pro moji bakalářskou práci je důležitá zmínka o měření akustické emise na řezací hlavici, respektive na usměrňovací trubici. V článku je zmíněno, že takto naměřený signál se dá použít pro monitorování konstantního průtoku abraziva.

3.3 Porovnání akustické emise obrobku a vertikální síly

On-line monitoring of depth of cut in AWJ cutting [9] (Online monitoring hloubky řezu vodního abrazivního paprsku)

Autoři: Ashraf I. Hassan, C. Chen, R. Kovacevic

Článek pojednává o procesu sledování hloubky řezu abrazivního vodního paprsku. Tato práce navrhuje model sledování hloubky řezů na základě akustické emise místo monitorování vertikální řezné síly. Autoři zjistili, že energie akustické emise se lineárně zvyšuje s nárůstem hloubky řezu. Energie akustické emise by tak mohla být použita pro monitorování hloubky řezu. Výsledky článku ukazují, že akustická emise je jednou z nejvhodnějších metod sledování abrazivního vodního paprsku, protože signál akustické emise má vysokou citlivost vůči kolísání hloubky řezu. Článek porovnává naměřené údaje z měření vertikální síly a právě nového modelu měření akustické emise. Měření probíhala společně, proto jsou v článku porovnaná data a výsledky jsou velmi přesvědčivé. Dále vybírám z článku jen informace o akustické emisi vzhledem k tématu mé práce. Díky tomu, že frekvenční obsah signálu akustické emise, typicky vyšší než 100 kHz, přesahuje rozsah frekvencí obecně spojených s dynamickým chováním obráběcích strojů a nástrojů pro řezání, je akustický signál přímo spojen s deformací, třením a porušováním materiálu obrobku. Je třeba poznamenat, že akustická emise detekuje vlny vyvolané lokální deformací v namáhaném materiálu.

Autoři naměřili data na tříosém CNC abrazivním vodním paprskem. Na stůl stroje byl namontován dynamometr, který měřil vertikální sílu. Snímače akustické emise byly připevněny po stranách obrobku. Čerpadlo má maximální tlak 414 MPa, vodní tryska použitá v průběhu této práce má vnitřní průměr 0,33 mm, zatímco usměrňovací trubice má

vnitřní průměr $1,02\text{ mm}$ a délku 76 mm , abrazivo použili granát mesh 80. Materiál obrobku pro experimenty je uhlíková ocel AISI 1018 válcovaná za studena. Rozměry každého vzorku jsou $(13 - 100 \times 65)\text{ mm}$. V tomto článku je představen způsob zpracování signálu pomocí vlnkové transformace. Na rozdíl od Fourierovy transformace, která poskytuje přesné informace o frekvenci, vlnková transformace poskytuje informace o časové lokalizaci spektrálních složek. Vlnková transformace je vhodnější pro analýzu komplexních signálů. Vodní abrazivní paprsek při řezání právě emituje takovéto signály. Vlnky s vysokou frekvencí mají krátkou dobu trvání a vlnky s nízkou frekvencí mají relativně dobré frekvenční rozlišení. Vlnková transformace signálů pomáhá stanovit vztah mezi akustickými emisemi a řeznými parametry.

Obě techniky sledování hloubky řezu (tzn. sledování vertikální řezné síly a zpracování akustické emise) poskytují podobnou predikci hloubky řezu. Avšak technika měření vertikální síly je kvůli vysokým nákladům a nepraktičnosti kvůli erozi dynamometru méně výhodná. Proto by použití senzorů akustické emise mohlo být výhodnější.

Článek uvádí zajímavé informace o měření akustických signálů na obrobku. Avšak pro měření vibrací na řezné hlavici nejsou některé informace důležité. Velmi zajímavá je metoda zpracování signálu. Vlnková metoda by mohla být nástrojem pro zpracování vibrací řezné hlavy, protože by šlo identifikovat okamžité frekvence daného signálu a bylo by možné redukovat tak nepodstatný šum.

3.4 Měření vibrací na obrobku

Determination of vibration frequency depending on abrasive mass flow rate during abrasive water jet cutting [22] (Stanovení frekvencí vibrací v závislosti na průtoku abraziva během řezání vodním abrazivním paprskem)

autoři: Pavol Hreha, Agáta Radvanská, Sergej Hloch, Vincent Peržel, Grzegorz Królczyk, Katarína Monková

V článku se autoři zabývají stanovením frekvence emitovaných vibrací v závislosti na nárazu abrazivních částic při řezání materiálů, které měřili na obrobku. Výsledky výzkumu jsou užitečné pro zlepšení kvality povrchu vytvořené abrazivním vodním paprskem a mohou podpořit on-line řízení procesu řezání vodním abrazivním paprskem. Při procesu řezání vodním abrazivním paprskem dochází k širokému spektru doprovodných jevů, které se projevují jako vibrace a akustické emise. Cílem této práce je podrobnější výzkum

drsnosti řezaného obrobku, výzkum topografie řezných ploch a určení závislosti mezi geometrií řezné plochy a naměřenými vibracemi a hlukovými emisemi. V závislosti na chování emisí hluku, nebo vibrací, chtějí autoři zvýšit přesnost a pravděpodobnost předpovědi kvality povrchu. Dalším cílem je nalézt a zpracovat jednoduchý model vycházející z experimentů, který by bylo možno aplikovat v praxi. Autoři se zaměřují na příčiny vzniku nepravidelností v topografii materiálu, tak aby mohly být dodrženy požadavky na kvalitu povrchu, zejména drsnost a rovnoměrnost, nebo jiné povrchové topografické charakteristiky řezaného materiálu.

Hlavní jev, který generuje vibrace v řezaném materiálu, je kontakt paprsku s obrobkem v okamžiku odstraňování materiálu. Četnost nárazů abrazivních částic je určena rychlostí průtoku abraziva. Narážení těchto částic na povrch materiálu obrobku má velký význam pro generování vibrací řezaného materiálu. Vyšší hmotnostní průtok způsobuje, že na řezaný materiál narazí více částic. To znamená, že se vyskytnou další impulsy generující vibrace. Každé působení abrazivních částic vytváří v řezaném materiálu vibrace a také akustický efekt. Existuje reálný předpoklad, že abrazivní částice vystřikovaná z usměrňovací trubice s vodním paprskem, přenáší svou kinetickou energii nejprve porušovanému materiálu, přičemž generuje vibrační a akustickou emisi vyšších frekvencí. Následně se odráží od jiných abrazivních částic, nebo částecek porušovaného materiálu a vytváří emise s nižší frekvencí.

Autoři k určení příčin vzniku vibrací a akustických emisí provedli experiment pomocí nejprve výpočtů a následně pokusu, který pomůže určit základní frekvenci, kterou vodní abrazivní paprsek působí na řezaný materiál. Při stanovení základní frekvence emisí vibrací během působení vodního abrazivního paprsku je autory použita teze, že frekvence nárazu abrazivních částic na obrobku se rovná frekvenci základního prvku vibrací a akustických emisí. Výše uvedený předpoklad je založen na dlouhodobém sledování doprovodných fyzikálních jevů a znalostech o akustice a teorii tvorby vibrací.

Pro ověření zkoumané hypotézy byl použit hmotnostní průtok abraziva 250 a 400 g/min při rychlosti posuvu řezné hlavice 50, 75, 100 a 150 mm/min . Autoři použili abrazivo o zrnitosti mesh 80 a usměrňovací trubice s průměrem 0,8 a 1,4 mm . Vibrace byly měřeny jednosměrnými akcelerometry PCB IMI typ 607A11 upevněnými na nerezové oceli AISI 309 o rozměrech (200 x 50 – 15) mm . Vibrace byly zpracovány softwarem LabVIEW.

U průtoku 250 g/min autoři předpokládali kolísání počtu částic dopadajících na materiál za jednotku času v rozmezí od $+20$ do -20% , ovšem k výpočtu množství částic použili velmi nepřesný výpočet, takže jim počet částic vyšel výrazně menší. Předpokládají, že frekvence nárazu abrazivních částic s danými vstupními faktory se bude pohybovat od 7000 do 9500 Hz . Při vyšším hmotnostním průtoku 400 g/min se uplatňuje kolísání množství částic za jednotku času v rozmezí od přibližně $+10$ do -10% . Podle této podmínky je výsledkem frekvenční spektrum nárazů abrazivních částic od 12000 do 14500 Hz . Tyto vypočítané hodnoty frekvence abrazivních částic, které působí na obrobek, mají teoretický význam. Skutečné chování spektra vibrací a chování maximálních odchylek základních frekvenčních nebo harmonických hodnot jsou ovlivněny následujícími faktory: průměrem usměrňovací trubice, množstvím nárazů mezi brusnými částicemi, množstvím nárazů s částicemi řezaného materiálu, nehomogenitou řezaného materiálu, tvarem řezaného materiálu a jeho velikostí, poměrem mezi pevnou částí materiálu, která ještě nebyla vyříznutá, a částí již vyříznutého materiálu, délkou řezné mezery. Samotný dopad abrazivních částic je do značné míry ovlivněn vstupními faktory souvisejícími s usměrňovací trubicí: průměrem trubice, tvrdostí trubice (povrchová tvrdost vnitřního prostoru) a drsností vnitřního povrchu trubice. Zvláště důležitý je vnitřní průměr usměrňovací trubice, protože plocha paprsku se s průměrem mění. Plocha paprsku vysvětluje také rozdíly v hodnotách frekvencí měřených při stejném průtoku abraziva, avšak s různými průměry usměrňovací trubice. Když je průměr $1,4\text{ mm}$, plocha paprsku je větší, takže částice abraziva jsou rozptýleny na větší ploše. Existuje tedy reálný předpoklad, že částice se pohybují přímočaře až do okamžiku než narazí na materiál. Naproti tomu u průměru $0,8\text{ mm}$ se část abrazivních částic srazí s jinými částicemi ještě předtím, než narazí na obrobek. To je důvod, proč je základní frekvence vyšší u frekvenčního spektra naměřeného při použití usměrňovací trubice o průměru $1,4\text{ mm}$ než v případě experimentu s průměrem trubice $0,8\text{ mm}$.

Vibrační spektrum při abrazivním hmotnostním průtoku 250 g/min vykazovalo větší rozpětí hodnot frekvence abraziva, které naráží na řezaný materiál. Spektrum se pohybovalo od přibližně 6000 Hz do přibližně 9000 Hz . Pravděpodobně to bylo způsobeno šířením rychlostí jednotlivých abrazivních částic a jejich velikostí, které neodpovídají ideální velikosti nebo ideálnímu kulatému tvaru, který byl uvažován ve výpočtu. Při abrazivním hmotnostním průtoku 400 g/min bylo zřejmé, že hodnota píku vibračního spektra průtoku se blíží vypočítané hodnotě frekvence odpovídající abrazivním

částicím, které působí na materiál. Jeho hodnota činila 13320 Hz a odpovídala v případě obou průměrů (0,8 a 1,4) usměrňovací trubice.

Autoři upozorňují, že signál vibrací se také skládá z frekvence řezaného materiálu. Předpokládají, že bude mít jen malý vliv na vypočítané a naměřené hodnoty vibračního spektra vytvořeného nárazem abrazivních částic na řezaný materiál. Výsledné spektrum signálu je ale ovlivněno opotřebením usměrňovací trubice. Navíc byl prokázán vliv hmotnostního průtoku abraziva na RMS (Root Mean Square) parametr vibrací. Nižší hodnoty parametru byly zaznamenány při vyšších hmotnostních průtocích abraziva. Autoři článku také zjistili, že píky ve frekvenčním spektru se při změně hmotnostního průtoku abraziva posunuly. Vysoké píky byly zaznamenány ve vysokofrekvenční oblasti spektra při vyšších hodnotách hmotnostního průtoku abraziva.

Článek je rozhodně zajímavý z pohledu informací ohledně změny frekvencí v závislosti na některých parametrech a veličinách vodního abrazivního paprsku. Pro moji bakalářskou práci je však méně zajímavé, že jsou vibrace měřeny na obrobku. Autoři data zpracovávají rychlou Fourierovou transformací. Některá tvrzení z článku jsem se pokoušel ověřit a píšu o nich v podkapitole 4.3.

3.5 Monitoring pomocí akustické emise

On use of acoustic emission in monitoring of under and over abrasion during a water jet milling [30] (Použití akustické emise pro monitoring nadořežů a podřežů při frézování materiálu vodním abrazivním paprskem během frézování)

autor: Jerzy MIKLER

Smyslem tohoto článku je přezkoumat příspěvky vztažené k monitoringu vodního abrazivního paprsku a pro tento účel vyhodnotit použitelnost akustického emisního signálu. Důraz autor klade na kontrolu možnosti použití signálu akustické emise pro on-line detekci nadořežů a podřežů během procesu řezání.

Akustická emise je vysokofrekvenční signál pocházející z deformačních zón, generovaný rychlým uvolňováním deformační energie. Během řezání kovů je signál vytvářen z mnoha různých zdrojů: dislokacemi krystalů generovanými vlivem elastických a plastických deformací uvnitř nebo na povrchu obrobku, zbytkovým napětím, třením nástroje po obrobku, teplotou změny fáze, štěpením, zlomením, nahromaděním otřepu, odtrhávání nástrojového materiálu a podobně. U abrazivního vodního paprsku jsou

významným zdrojem emisí i turbulentní proudění a kavitace. Akustické emise jsou také ovlivněny dynamikou obráběcích strojů a vybranými řeznými parametry. Kromě toho jsou vlny tlumeny, odraženy, vzájemně se ruší a než dorazí k senzoru, jsou zkreslené. Část energie se dále utlumí tekutinou, takže získávání informací z těchto signálů není triviální. V praxi však vždy existuje dominantní zdroj akustické emise, který nakonec určuje obecné charakteristiky signálu.

Autor se zmiňuje o tom, že v literatuře je k dispozici několik modelů procesu řezání vodním abrazivním paprskem a ty mohou být upraveny pro účely monitoringu. Některé z nich se zaměřují na vysvětlení působení jednotlivých abrazivních částic, jiné zase na vztah mezi parametry procesu, jako je hloubka a tvar řezu, drsnost povrchu apod.

Kritickými parametry ovlivňujícími proces řezu abrazivním vodním paprskem jsou vlastnosti materiálu, tlak čerpadla, průměr trysky, vzdálenost usměrňovací trubice od obrobku, úhel mezi paprskem a rovinou obrobku, průtok abraziva, velikost zrna abraziva, rychlost posuvu a působení odraženého paprsku.

Autor dále vypisuje metody analýzy signálu, které využili výzkumníci v minulosti pro vyhodnocování akustických emisí v souvislosti s parametry procesu řezu, které jsou shrnuty v následujícím seznamu:

1. Peak-to-peak, průměr, výkon, RMS, směrodatná odchylka, zkosení, kurtóza.
2. Ring down count - počet kolikrát signál překročí prahovou úroveň.
3. Šířka impulsu -procento času, kdy signál zůstává nad prahem.
4. Rychlost porušení -kolikrát signál RMS překročí nastavenou prahovou hodnotu za sekundu.
5. Korelační analýza.
6. Beta Distribuce.
7. Modely ARMA (Autoregressive Moving Average).
8. PCA (Principal component analysis) -transformace Karhunen-Loeve.
9. SSA(Singular spectrum analysis) -rozdělení signálu na trend, oscilační složka a hluk.
10. Permutační entropie -vyšetření variability signálu.
11. Fourierova transformace, FFT.
12. Vlnková transformace, WT.
13. Hilbert-Huangová transformace, HHT.

V této práci je popsáno podrobné vyhodnocení použitelnosti akustické emise pro účel monitoringu. Ukazuje se, že obvyklé charakteristiky signálu, jako je průměr, směrodatná odchylka, sklon a kurtóza aplikované na signál akustické emise, neumožňují významné rozlišení mezi nadořezy a podřezy. Také RMS výkon (nebo energie) signálu akustické emise neumožňuje dostatečné rozlišení signálu pro monitoring. Autor připomíná, že je zapotřebí další výzkum k nalezení nových metod monitorování.

V článku se dále popisuje experiment, kdy formou předběžné studie, na základě analýzy signálu, vyhodnocoval použitelnost akustické emise pro sledování procesu vodního abrazivního paprsku se zaměřením na předpovídání rychlosti odstraňování materiálu a kvalitu povrchu. Pro analýzu signálu použil autor RMS, průměr, směrodatnou odchylku, sklon a kurtózu. Úhel dopadu trysky byl v tomto experimentu kolmý na obrobek. Materiál obrobku byl titan Ti6Al4V, abrazivo autor použil Australský granát mesh 80, snímač měl typu Kistler 8152, připevněný šroubem k obrobku.

Studie byla zaměřena na posuv, průtok abraziva a tlak. Autor nenašel spojitosti mezi klíčovými frekvencemi na střední frekvenci abraziva dopadajícího na plochu obrobku. Např. pro abrazivo mesh 80 o průtoku 20 g/min by měla být frekvence kolem 47 kHz - frekvence, která neodpovídá naměřeným 108 kHz . To může být vysvětleno tak, že abrazivní částice náhodně zasahující obrobek, ho nutí kmitat svou rezonanční frekvencí. Tuto hypotézu autor zatím nepotvrdil.

Článek je dobrým výčtem a sumarizací problému kolem akustické emise, jako nástroje pro monitoring procesu řezání. Autor sepsal všechny doposud použité metody zpracování signálu, což beru jako zajímavý přínos pro další experimenty.

3.6 Měření vibrací na vodním abrazivním paprsku

Monitoring of vibrations in the technology of AWJ [31] (Monitorování vibrací v technologii AWJ)

autoři: KRENICKÝ Tibor a RIMÁR Miroslav

Vibrace řezné hlavice jsou jeden z elementů, který způsobuje striace obráběného povrchu materiálu. V tomto článku se autoři zaměřují na měření a vyhodnocení vibrací generovaných během obrábění vodním abrazivním paprskem. Hlavním cílem této práce je sledovat klíčové zdroje vibrací během řezání vodním abrazivním paprskem. Vibrace autoři měří na řezné hlavici a vysokotlakém čerpadle.

Striace se vysvětlují jako jev vznikající při interakci paprsku s pevným materiálem. Bylo zjištěno, že povrch vytvářený paprskem silně trpí účinky pohybu řezné hlavice a striace mohou být přímo přičítány vibracím řezné hlavice. Morfologie povrchu odhalila, že striace začaly na vrcholu řezu a postupně se zvětšovaly díky vibracím a poklesu energie vodního abrazivního paprsku. Tvzení, že vibrace jsou hlavní příčinou striací, bylo potvrzeno řezem vodním paprskem na materiálech s nízkou hustotou. Vibrace generované vodním abrazivním paprskem mohou být vzhledem k původu rozděleny na exogenní a endogenní. Exogenní vibrace jsou kmity obrobku způsobené paprskem, který působí ve vzduchu na obrobek, zařízení a vodu ve sběrači. Endogenní jsou inherentní vibrace paprsku způsobené vibracemi řezné hlavice, polohovacím a zesilovacím systémem a vibracemi trysky. Základním předpokladem pro spojení striací s vibracemi trysky je to, že střední vzdálenost mezi striacemi je srovnatelná s průměrem paprsku, což umožňuje předpokládat, že striace jsou vytvořeny v důsledku nestability paprsku. Vibrace paprsku však nemusí nutně odpovídat vibracím trysek. Předpokládáme, že při rychlosti paprsku 900 m/s může být paprsek považován za pevnou látku a může se stát, že řezná hlavice přenáší své vibrace na obrobek a naopak.

Autoři data měřili v laboratoři Katedry fyziky VŠB-TUO, kde použili čerpadlo o tlaku 380 MPa , průměr trysky $0,25\text{ mm}$, vzdálenost usměrňovací trubice od porušovaného materiálu 2 mm , usměrňovací trubici o průměru $1,02\text{ mm}$ a délkou 75 mm , rychlost posuvu měli 100 mm/min a do paprsku přidávali abrazivo australský granát mesh 80. Vibrace řezné hlavice byly monitorovány pomocí modulu NI-9233 v kombinaci s CompactDAQ NI-9172. Vibrace řezné hlavice byly studovány hlavně ve vodorovném směru kolmo ke směru paprsku, ale rovněž byly monitorovány i ve svislém směru. Autoři zpracovali data pomocí aplikací LabVIEW Sound a Vibration Toolkit. Kromě toho byly pomocí akcelerometrů měřeny i vibrace na čerpadle a potom byly monitorovány pomocí diagnostického systému založeného na platformě OKTALON. Data analyzují rychlou Fourierovou transformací.

Hlavní pozornost byla věnována monitorování vibrací hlavice v horizontálním směru, kolmo na šířku řezu. Intenzita těchto vibrací je úzce spojena s profilem řezného povrchu a má vliv na kvalitu řezu. Spektra vibrací naměřených na řezné hlavici korelovala se spektry drsnosti řezaného povrchu. Následně byly provedeny vylepšení technologie vodního abrazivního paprsku s cílem potlačit prořezávání pomocí oscilace trysky. Účinnost řezání je zhoršena vibracemi, což způsobuje problémy s dokončením řezu materiálu.

Snížení těchto vibrací umožňuje dosáhnout zlepšení kvality povrchu obrobku, zejména drsnosti. Nejvíce intenzivní vibrace byly naměřeny na motoru čerpadla, který je také hlavním zdrojem akustických emisí v místnosti. Charakteristiky vibrací naměřené na vysokotlakém čerpadle ukazují závislosti na změnách pracovního tlaku. Autoři však neprokázali spojitost s vibracemi na řezné hlavici. Byly identifikovány tři hlavní situace způsobující vibrace: změna pracovního tlaku, přerušení proudění vody a změna rychlosti posuvu.

Aby se snížily vibrace zjištěné v tomto výzkumu, je možné stabilizovat trysku zvýšením setrvačnosti, jak uvádí autoři. Vliv exogenních vibrací lze snížit umístěním a stabilizací mříží pod obrobkem, upevněním obrobku pomocí vhodného vybavení, aby se eliminovala činnost zpětných vln vody z nádrže a aby byla chráněna hlavice před vodou.

Článek se zabývá vibracemi z pohledu dopadu na kvalitu povrchu. Přínosem je, že autoři měří vibrace na řezné hlavici a hledají faktory, které ovlivňují vibrace. Data jsou stejně tak jako v mojí práci analyzovaná pomocí rychlé Fourierovy transformace. Zvláštností je, že autoři měřili vibrace i na vysokotlakém čerpadle.

4 Experimentální část

Od února 2017 navštěvuji laboratoř kapalinového paprsku, kterou vede prof. Ing. Libor Hlaváč, Ph.D. Kapalinový paprsek se nachází v místnosti J165 a zde i probíhalo měření vibrací na řezné hlavici. Přístrojové vybavení laboratoře použité při experimentu:

Vysokotlaké čerpadlo PTV 19/60 na bázi Flow HSQ 5X; tlak do 415 MPa, průtok do 1,9 l/min

Řezací X-Y CNC stůl WJ1020-1Z-EKO s příslušenstvím

Akcelerometry PCB Model 352C33

PC s měřicí kartou NI PCI-6251 M series DAQ

4.1 Záznam měření:

Data se měřila pomocí softwaru Signal Express od National Instruments. Akcelerometry jsou připojeny do převodníku analogového signálu na digitální (A/D převodník) obrázek 4.1. Z A/D převodníku je pomocí kabelu přes NI PXI-ExpressCard8360 obrázek 4.2 přiveden signál do karty počítače. V programu byl vytvořen projekt pro záznam vibrací. Software od NI byl zvolen z důvodu kompatibility s měřicí kartou.



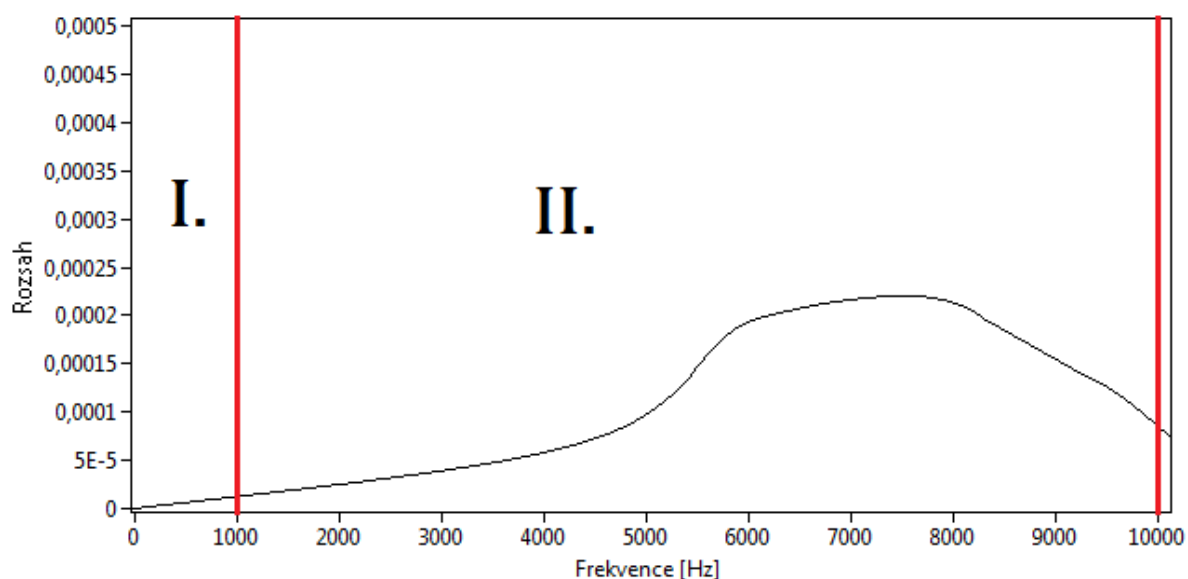
Obrázek 4.1 Ni PXIe-1073



Obrázek 4.2 NI ExpressCard - 8360

4.2 Zpracování signálu:

Právě protože signály byly měřeny pomocí softwaru a hardwaru od NI, bylo v rámci zpracování signálů rozhodnuto o použití softwaru LabVIEW. Základní program pro zpracování vibrací byl již v laboratoři používán, bylo však třeba odstranit některé zásadní nedostatky a tak dosáhnout zlepšení kvality analýzy signálů a jejich korelace s vývojem měřených dat. Po seznámení s prostředím LabVIEW jsem se rozhodl program upravit a vytvořit finální vlastní verzi, ve které byla všechna data zpracována. Funkčnost Fourierových transformací jsem ověřil vizuálně pomocí programu Matlab, kde výsledky odpovídaly výsledkům z programu LabVIEW. Hodnoty maximálních píků ve frekvenčním spektru a RMS signálu jsem ověřil pomocí původního programu. Prostředí tohoto programu je velmi přehledné a pro analýzu dat rychlé a jednoduché. Pro přehlednější výsledky jsem do programu zavedl Butterworthův filtr druhého řádu pro horní propust'. Hlavní důvod filtrování dat bylo rušení signálu šumem nízkých frekvencí pod 1000 Hz. Nízké frekvence se objevovaly v závislosti na okolních rušivých elementech, jako jsou vlny vody z nádrže, krokové motory stolu apod. V obrázku 4.3 je ukázkový model, kde v oblasti I. jsou data odfiltrovaná, oblast II. je zájmová analyzovaná část signálu.



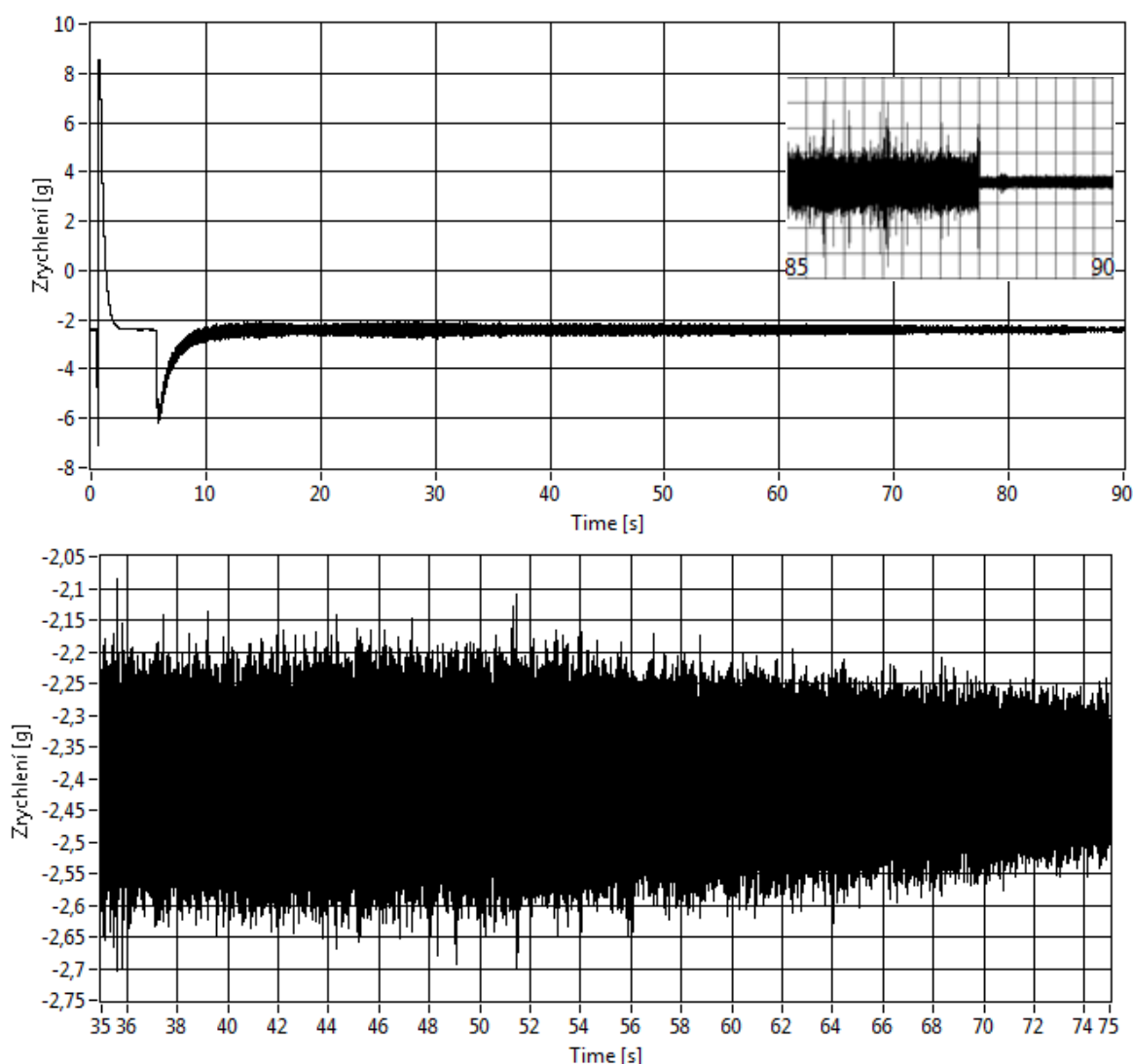
Obrázek 4.3 Model signálu

Po načtení dat do programu, si uživatel prohlédne časový signál. Signály jsou rozvětveny každý zvlášť a očíslovány podle akcelerometrů. Po té co obsluha vybere z časového signálu oblast, kterou chce analyzovat, pomocí FFT se převede signál na frekvenční spektrum a projde přes filtr. V grafu se poté vykreslí frekvenční přefiltrované spektrum. Výsledné signály jsou statisticky analyzovány a program vypíše RMS časového signálu, maximum největšího píku a jeho frekvenci. RMS neboli efektivní hodnota kvantitativně určuje velikost měnící se veličiny. Ta byla vyhodnocována jen pro potvrzení či vyvrácení tvrzení v článku [22].

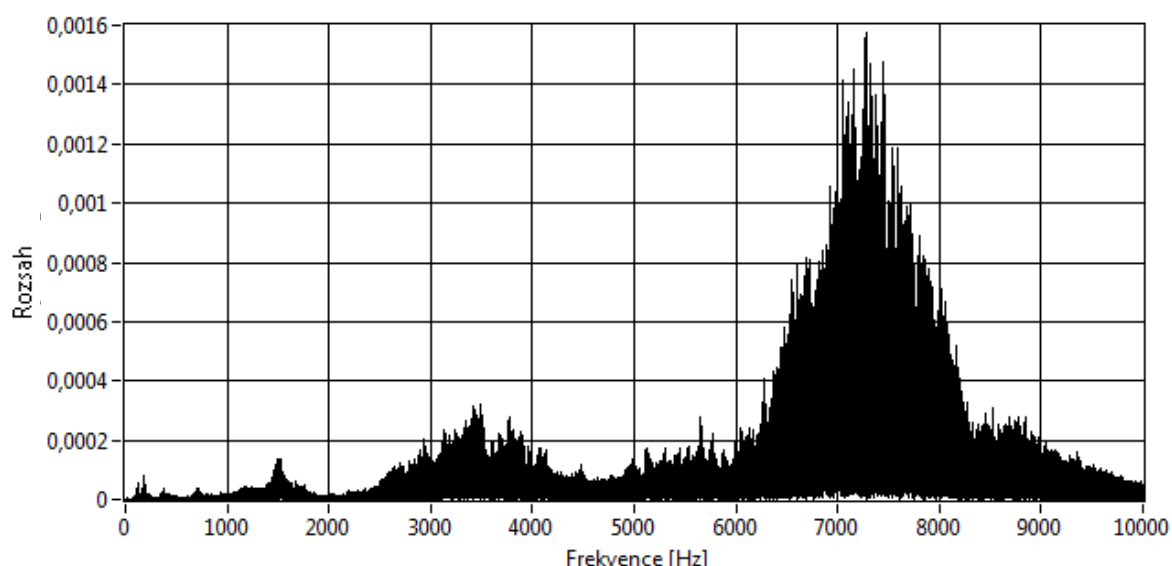
Výsledný program pro analýzu signálu je vidět na obrázek 4.4.

4.3 Měření vibrací:

Problém při měření vibrací byl, že na začátku každého měření se rozhodí signály akcelerometrů, jak lze vidět v prvním grafu v obrázku 4.5. Zde se signál ustaluje až po 10 sekundě měření. To znamená, že při každém vrtu se pár vteřin vrtalo de facto bez záznamu kvalitního signálu. Následující graf, ve zmíněném obrázku, ukazuje použitelný výřez časového signálu, který lze bez problému analyzovat. Po přiblížení prvního grafu, jak lze vidět ve zvětšeném výřezu, lze rozeznat, kdy se materiál provrtá skrz. To znamená, že přímo u měření, on-line, lze vysledovat a odhadnout v časové závislosti, kdy se začal materiál vrtat a kdy došlo k průniku skrz. Takže ze záznamu časové závislosti lze posoudit dobu, po kterou se materiál vrtal. Graf v obrázku 4.6 ukazuje již frekvenční spektrum analyzovaného výřezu.



Obrázek 4.5 Časový průběh naměřeného signálu



Obrázek 4.6 Frekvenční spektrum

Důvod proč signály na prvních pár sekund nahodile vyletí do velkých amplitud, nebyl nalezen, a tudíž nebyl také eliminován. Proto mohly být zpracovány jen dostatečně dlouhé signály, např. z měření kdy se materiál vrtal dlouho. Jakmile se signál ustálí, není zde už žádné rušení, tedy kvalita signálu není při delším měření špatná. Při dalších měřeních a jiných experimentech se toto rušení znovu objevuje. V dalších podkapitolách je popsáno, jak je možné se rušení vyhnout.

Akcelerometry byly přilepeny k řezné hlavici speciálním voskem určeným pro tyto účely. Výhoda vosku spočívá v tom, že lze umýt jak z akcelerometrů, tak i řezné hlavice bez zanechání stop. Na řezné hlavici je místo, které se používá k jejímu utažení. Využili jsme jejího šestibokého tvaru a akcelerometry jsme zde připevnili po 120° viz obrázek 4.7. Akcelerometry jsou postupně přilepeny proti směru hodinových ručiček, s tím že akcelerometr číslo 3 je téměř naproti vstupu abraziva do směšovací komory. V následujících tabulkách budou veličiny označeny spodním indexem n , který koreluje s číslem akcelerometru. Označení \max_n jsou hodnoty maximálního píku ve spektru, vyjadřující kolikrát harmonická funkce s příslušnou frekvencí f_n [Hz] přispěla do naměřeného signálu, tedy v podstatě četnost výskytu jmenované frekvence. RMS_n (Root Mean Square) je potom výše zmíněná efektivní hodnota zrychlení v časovém záznamu. Příslušná frekvenční spektra k tabulkám 4.2 až 4.4 podle souvisejících názvů jsou v příloze 1 až 3. V grafech je vždy název ve tvaru FFT Peak An, kde n označuje číslo akcelerometru.



Obrázek 4.7 Připevnění akcelerometrů na řezné hlavici

4.3.1 Měření vibrací při vrtání různých druhů materiálů

Měření souboru signálů probíhalo při vrtání děr do různých materiálů o tloušťce 10 mm. Z důvodu krátkého času vrtání některých měkkých materiálů byl při analýze zvolen čas analyzovaného výřezu signálu v průběhu vrtu na 3 s. Abrazivo bylo použito australský granát o zrnitosti mesh 80. Hmotnostní průtok abraziva byl zvolen 226 g/min. Fyzikální vlastnosti použitých materiálů při vrtech jsou popsány v tabulce 4.1 [32].

Tabulka 4.1 Vlastnosti materiálů

| | | ρ_{exo} | ρ_{tab} | δ (%) | σ_t [MPa] | H (průměr) |
|-----|--------|---------------------|---------------------|--------------|------------------|------------|
| K1 | 11523 | 7772 | 7850 | 1 | 445 | 126 |
| K3 | 12050 | 7651 | 7870 | 3 | 621 | 170 |
| K2 | 14220 | 7746 | 7850 | 1 | 880 | 246 |
| K5 | 15142 | 7879 | 7850 | <1 | 658 | 190 |
| K6 | 17246 | 7521 | 7900 | 5 | 515 | 145 |
| K4 | 1.2436 | 7674 | 7600 | 1 | 656 | 242 |
| K8 | 2017 | 2767 | 2800 | 1 | 419 | 123 |
| K9 | certal | 2738 | 2760 | <1 | 556 | 183 |
| K10 | měď | 8434 | 8940 | 6 | 211 | 41 |
| K13 | hardox | 7856 | 7900 | <1 | 1679 | 512 |

Tabulka 4.2 Vrtání různých materiálů

| název | RMS_1 | $f_1[Hz]$ | max_1 | RMS_2 | $f_2[Hz]$ | max_2 | RMS_3 | $f_3[Hz]$ | max_3 |
|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| K1 vrt | 0,0896455 | 8787,19 | 0,0049765 | 0,105391 | 8504,52 | 0,0071546 | 0,102411 | 8787,19 | 0,0050885 |
| K1 vrt2 | 0,119908 | 7528,87 | 0,0052992 | 0,118577 | 8254,2 | 0,0055467 | 0,168922 | 8696,19 | 0,0052673 |
| K2 vrt | 0,144763 | 7465,21 | 0,0043841 | 0,149059 | 8333,53 | 0,0045054 | 0,161173 | 8685,19 | 0,0041396 |
| K2 vrt2 | 0,0715457 | 7540,87 | 0,0062013 | 0,089882 | 8067,87 | 0,0080017 | 0,120599 | 8676,52 | 0,0038074 |
| K3 vrt | 0,0981306 | 7375,21 | 0,0048664 | 0,0900426 | 8075,2 | 0,0073435 | 0,16585 | 8623,86 | 0,003431 |
| K3 vrt2 | 0,0824549 | 7374,88 | 0,0073788 | 0,099571 | 8099,2 | 0,0083855 | 0,0812878 | 8813,85 | 0,0035637 |
| K4 vrt | 0,119315 | 7412,54 | 0,0080935 | 0,264255 | 7991,2 | 0,0094203 | 0,0881803 | 8622,52 | 0,0058005 |
| K4 vrt2 | 0,125396 | 7342,54 | 0,0085787 | 0,154951 | 8189,53 | 0,0099852 | 0,172207 | 8763,52 | 0,0057454 |
| K5 vrt | 0,0973354 | 7564,87 | 0,0062964 | 0,0932226 | 8006,53 | 0,0068109 | 0,0891999 | 7915,2 | 0,0038807 |
| K5 vrt2 | 0,0915739 | 7478,54 | 0,0075426 | 0,103373 | 7755,87 | 0,0076231 | 0,130447 | 7672,21 | 0,0043217 |
| K6 vrt | 0,0929996 | 7450,54 | 0,006765 | 0,0921935 | 8160,2 | 0,0065484 | 0,0974351 | 7803,87 | 0,0048361 |
| K6 vrt2 | 0,0920631 | 7454,21 | 0,0083055 | 0,10054 | 8185,53 | 0,0086434 | 0,0726964 | 7599,54 | 0,0053282 |
| K8 vrt | 0,0473159 | 7673,87 | 0,0011896 | 0,103224 | 8386,86 | 0,0015141 | 0,0960383 | 8522,86 | 0,0011696 |
| K8 vrt2 | 0,05262 | 7563,87 | 0,0013592 | 0,0630362 | 8313,19 | 0,0020165 | 0,145586 | 8313,19 | 0,0013977 |
| K9 vrt | 0,0927147 | 7676,21 | 0,0014635 | 0,120198 | 8333,19 | 0,001433 | 0,12372 | 8684,52 | 0,0013235 |
| K10 vrt | 0,0790238 | 7494,21 | 0,0068902 | 0,0818081 | 8127,2 | 0,0051556 | 0,0916701 | 7494,21 | 0,0039785 |
| K10 vrt2 | 0,103476 | 7533,54 | 0,0073734 | 0,0886376 | 8129,86 | 0,0059779 | 0,113286 | 7681,54 | 0,0047031 |
| K13 vrt | 0,104048 | 7509,21 | 0,0072859 | 0,101482 | 7895,2 | 0,0061397 | 0,134838 | 7644,54 | 0,0043098 |
| K13 vrt2 | 0,105171 | 7438,21 | 0,0076155 | 0,125106 | 8160,86 | 0,0063554 | 0,132669 | 7783,54 | 0,0050839 |

Hmotnostní průtok byl při vrtání všech vzorků konstantní proto by měla být podle tvrzení v [22] efektivní hodnota (RMS) téměř stejná. Avšak jak lze vidět v tabulce 4.2, RMS faktor se nahodile mění a nelze zde hledat nějakou souvislost s hmotnostním průtokem abraziva. Důvod proč tomu tak je, může být shledán v tom, že v článku [22] měřili vibrace na obrobku. Také souvislost fyzikálních vlastností materiálu, resp. samotného materiálu s RMS a dalšími analyzovanými prvky nelze jednoznačně potvrdit. Například vzorek K3 a K5 je fyzikálními vlastnostmi podobný, ale frekvence naměřená akcelerometrem 3 se výrazně liší. Hmotnostní průtok abraziva byl konstantní, takže teze, že částice abraziva ve směšovací komoře narážejí na protilehlou stranu, kde se nachází akcelerometr 3, se nepotvrzuje, protože frekvence by zde musely být velmi podobné. Frekvence maximálních píků na akcelerometru 1 jsou až na vzorek K1 velmi podobné, avšak dále u akcelerometru 2 a 3 už podobné nejsou. Proto zde nelze najít souvislost materiálu a frekvence.

4.3.2 Měření vibrací při různých hmotnostních průtocích abraziva

Toto měření se zaměřilo na stříkání do vody, aby byl eliminovaný případný vliv obrobku. Měření bylo prováděno na několika místech $[x, y, z]$ stolu, čímž bylo možno zjistit, do jaké míry jsou naměřené signály ovlivněny mechanickými vlastnostmi zařízení. Při měření byly použity dva různé průtoky abraziva, v tabulce označeny pouze jednotkou g/min . Souřadnice $[0, 0, z]$ se nachází vpravo vpředu stolu. U krajů, tj. $[200, 100, z]$ by teoreticky měl být průhyb ramena menší, to znamená, že výchylka kmitů hlavice by měla být menší, frekvence vyšší. Další předpokládaná souvislost souřadnic je, že čím je rameno výš, tím méně by měly působit vlny z nádrže na akcelerometry. Z naměřeného signálu se ve všech případech použil výřez signálu dlouhý 15 s. Abrazivo zůstalo standartní, znovu australský granát mesh 80. Aby byl signál co nejkvalitnější, byly naměřeny dlouhé časové signály, takže počáteční rozhození signálů bylo mnohem kratší než signály určené ke zpracování. Jednotlivá měření jsou označena písmenem S a postupně očíslována od 1 po 23.

Tabulka 4.3 Stříkání do vody

| název | RMS_1 | $f_1[Hz]$ | max_1 | RMS_2 | $f_2[Hz]$ | max_2 | RMS_3 | $f_3[Hz]$ | max_3 | $[g/min]$ | $[x, y, z]$ |
|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------------|
| S1 | 0,0193764 | 5861,11 | 0,0006436 | 0,0198468 | 7344,64 | 0,0007165 | 0,0233935 | 7515,51 | 0,0007021 | 226 | [200,100,233] |
| S2 | 0,0211275 | 5983,91 | 0,0006312 | 0,0215808 | 7170,04 | 0,0008891 | 0,0256631 | 7479,91 | 0,0008293 | 393 | [200,100,233] |
| S3 | 0,0186521 | 7867,44 | 0,000477 | 0,0220611 | 7316,18 | 0,0006363 | 0,0206221 | 7867,44 | 0,0007376 | 226 | [200,100,290] |
| S4 | 0,02145 | 5966,91 | 0,000708 | 0,0226436 | 7409,51 | 0,0004086 | 0,0214524 | 5966,91 | 0,0006148 | 226 | [400,100,233] |
| S5 | 0,0217381 | 5896,38 | 0,0006571 | 0,0234447 | 7410,31 | 0,0008671 | 0,0268472 | 7410,31 | 0,0008125 | 393 | [400,100,233] |
| S6 | 0,0158444 | 6782,58 | 0,0003762 | 0,0135329 | 7390,58 | 0,0005702 | 0,0153015 | 7390,58 | 0,0006715 | 226 | [400,100,290] |
| S7 | 0,018241 | 5767,51 | 0,0004673 | 0,0175564 | 7339,11 | 0,0007393 | 0,0210681 | 7339,11 | 0,0007072 | 226 | [400,400,233] |
| S8 | 0,0206197 | 5836,85 | 0,0006221 | 0,0236788 | 7337,24 | 0,0009145 | 0,023731 | 7528,11 | 0,0008411 | 393 | [400,400,233] |
| S9 | 0,0196849 | 5759,9 | 0,0004685 | 0,0252888 | 7327,84 | 0,0003801 | 0,0230835 | 7943,82 | 0,0004214 | 226 | [600,100,233] |
| S10 | 0,02907 | 5891,05 | 0,0006138 | 0,0382208 | 7419,84 | 0,0008143 | 0,0410989 | 7457,18 | 0,0008276 | 393 | [600,100,233] |
| S11 | 0,0192338 | 7712,91 | 0,0003995 | 0,0221733 | 7407,58 | 0,0005392 | 0,0205072 | 7676,71 | 0,0006443 | 226 | [600,100,290] |
| S12 | 0,0209872 | 6037,98 | 0,0004137 | 0,0180645 | 7438,98 | 0,0005746 | 0,0227055 | 7618,51 | 0,0006962 | 226 | [600,400,233] |
| S13 | 0,0254742 | 7850,51 | 0,0005398 | 0,0387877 | 7435,91 | 0,0008094 | 0,0264932 | 7435,91 | 0,0008909 | 393 | [600,400,233] |
| S14 | 0,0206669 | 5973,65 | 0,0006846 | 0,0259535 | 8595,17 | 0,0004724 | 0,0215441 | 5966,91 | 0,0006185 | 226 | [800,100,233] |
| S15 | 0,0205395 | 5875,45 | 0,0006282 | 0,0294148 | 7414,78 | 0,0008775 | 0,0249855 | 7414,78 | 0,0007476 | 393 | [800,100,233] |
| S16 | 0,019273 | 7904,11 | 0,000393 | 0,0243759 | 7433,44 | 0,0006028 | 0,0201939 | 7632,44 | 0,0006468 | 226 | [800,100,290] |
| S17 | 0,0166604 | 7947,64 | 0,0003891 | 0,0173142 | 7412,51 | 0,0006265 | 0,0212909 | 7620,24 | 0,0006669 | 226 | [800,400,233] |
| S18 | 0,0208637 | 5736,51 | 0,0005976 | 0,0218942 | 7173,38 | 0,0008301 | 0,0269704 | 7522,17 | 0,000864 | 393 | [800,400,233] |
| S19 | 0,0269704 | 5970,05 | 0,0007642 | 0,0214359 | 8810,24 | 0,0006465 | 0,0204362 | 5969,45 | 0,0006518 | 226 | [1000,100,233] |
| S20 | 0,0322699 | 5768,58 | 0,0007523 | 0,0299576 | 7340,24 | 0,0009577 | 0,0241039 | 7648,31 | 0,0008626 | 393 | [1000,100,233] |
| S21 | 0,0235799 | 6741,04 | 0,0004399 | 0,0293826 | 7421,78 | 0,0006106 | 0,0235549 | 7632,71 | 0,0007118 | 226 | [1000,100,290] |
| S22 | 0,0158748 | 6818,44 | 0,0006153 | 0,0157892 | 7416,31 | 0,0008212 | 0,0199461 | 7416,31 | 0,000792 | 226 | [1000,400,233] |
| S23 | 0,0205695 | 7903,51 | 0,0004365 | 0,0225894 | 7333,38 | 0,0005935 | 0,0266054 | 7613,04 | 0,0006686 | 393 | [1000,400,233] |

Stříkání do vody, jak lze vidět v tabulce 4.3, nám přineslo poznatek, že RMS je většinou vyšší u většího hmotnostního průtoku. To rozporuje s tvrzením v [22], důvodem nejspíše je, že jsme vibrace měřili na řezné hlavici, ale ve výše zmíněném článku je měřili na obrobku. U akcelerometrů 2 a 3 je efektivní hodnota signálu vyšší u většího hmotnostního průtoku ve všech případech. U akcelerometru 1 byl v jednom případě výsledek opačný (měření S14, S15). Větší hmotnostní průtok způsobí vydatnější hustotu nárazů na protilehlou stěnu v směšovací komoře. U příslušných frekvencí maximálních píků se ve spektru neprojevila spojitost s hmotnostním průtokem, zdá se, že frekvence se mění nahodile. Maximální pík a jeho příslušná frekvence není plošně větší u akcelerometru 3, takže se neprokázal vliv nárazů abrazivních částic na protější stěnu komory při nasávání abraziva. Dále nelze jednoznačně říci, že průhyb ramena nějak ovlivňuje frekvence maximálních píků, protože frekvence se nemění podle původního předpokladu, ale v některých případech je frekvence u měření, kdy se řezná hlavice nacházela téměř vprostřed stolu, větší, než u kraje. Z dat nevidíme souvislost s polohami hlavice na ose z, resp. s působením vln z nádrže na akcelerometry.

4.3.3 Měření vibrací při použití různých druhů abraziva

Třetí a poslední měření zmíněné v této práci se zaměřilo na vrtání děr při použití různých druhů abraziva o stejném hmotnostním průtoku. Při měření jsme použili 5 různých abraziv, jedno z nich o třech různých zrnitostech: australský granát (aus) o zrnitosti mesh 50, 80, 120; indický granát (ind) o zrnitosti mesh 80; ukrajinský granát (ukr) o zrnitosti mesh 80; křemenný písek (krem) o nespecifikované zrnitosti a karbid křemíku (karb) také o nespecifikované zrnitosti. Granát má ve všech variantách stejné, resp. podobné fyzikální vlastnosti, odlišuje se však kvalitou a původem těžby. Karbid křemíku se vyznačuje vysokou pevností zrn, při směšování se příliš nerozpadá. Je velmi efektivní při porušování kovů a jiných materiálů, ale nevýhoda je, že velmi ničí usměrňovací trubici. Proto byla při měření s karbidem křemíku použita opotřebovaná usměrňovací trubice, tzn. trubice s větším vnitřním průměrem.

Naměřený signál se opět nepoužil pro zpracování celý, ale plošně se použil výřez signálu o délce 40 s. Hmotnostní průtok abraziva byl kalibrován pro všechny druhy abraziva na 250 g/min. Aby se eliminovalo rušivé rozhození signálu ze začátku měření, byla použita ocel o tloušťce 30 mm, což zajistilo dostatečně dlouhou dobu vrtání na to, aby se signály ustálily.

Tabulka 4.4 Vrtání s různými abrazivy

| název | RMS_1 | $f_1[Hz]$ | max_1 | RMS_2 | $f_2[Hz]$ | max_2 | RMS_3 | $f_3[Hz]$ | max_3 | mesh |
|-------|----------|-----------|----------|----------|-----------|----------|---------|-----------|----------|------|
| aus | 0,066886 | 7052,57 | 0,001515 | 0,051514 | 7423,34 | 0,001458 | 0,0805 | 7423,34 | 0,00178 | 50 |
| aus | 0,058091 | 6685,29 | 0,001499 | 0,050337 | 7154,07 | 0,001377 | 0,0693 | 7154,07 | 0,001748 | 50 |
| aus | 0,057921 | 7053,12 | 0,001159 | 0,056391 | 7380,24 | 0,001845 | 0,08389 | 7380,24 | 0,002176 | 80 |
| aus | 0,065043 | 7107,99 | 0,001560 | 0,051027 | 7318,02 | 0,001717 | 0,07868 | 7318,02 | 0,001993 | 80 |
| aus | 0,047645 | 6711,99 | 0,000648 | 0,041481 | 7316,74 | 0,000887 | 0,07151 | 7664,09 | 0,001159 | 120 |
| aus | 0,044169 | 5896,02 | 0,000832 | 0,037892 | 7318,94 | 0,001094 | 0,05751 | 7420,72 | 0,001320 | 120 |
| ind | 0,060409 | 7016,04 | 0,001471 | 0,042391 | 7335,29 | 0,001283 | 0,06671 | 7262,77 | 0,001583 | 80 |
| karb | 0,069466 | 2629,3 | 0,001147 | 0,086204 | 2674,07 | 0,001604 | 0,06991 | 2753,1 | 0,000994 | |
| karb | 0,107156 | 3179,85 | 0,001281 | 0,103247 | 2680,67 | 0,001924 | 0,10679 | 2698,07 | 0,00131 | |
| karb | 0,09695 | 2641,35 | 0,001285 | 0,092536 | 2596,25 | 0,001997 | 0,09891 | 3794,15 | 0,001228 | |
| krem | 0,074321 | 7093,19 | 0,001682 | 0,077349 | 7164,14 | 0,001813 | 0,08112 | 7164,14 | 0,002198 | |
| ukr | 0,097329 | 7082,67 | 0,001295 | 0,093478 | 7431,74 | 0,001264 | 0,10505 | 7431,74 | 0,001674 | 80 |

Jak lze vidět v tabulce 4.4, frekvence všech abraziv, až na výjimku karbidu křemíku, jsou u akcelerometru 2 a 3 podobné. Protože byl použit stejný hmotnostní průtok abraziva, shledávám to jako souvislost mezi průtokem a frekvencí. Odlišná frekvence u karbidu křemíku má vysvětlení v tom, že trubice použitá při měření s karbidem měla již opotřebovaný vnitřní průměr. V článku [22] se uvádí možná souvislost vnitřního průměru usměrňovací trubice s frekvencí. V tabulce 4.4 všechna měření s karbidem při použití většího průměru usměrňovací trubice mají mnohem menší frekvence než ostatní abraziva. To je v rozporu s tvrzením v článku [22]. Vysvětlení je znovu v tom, že jsme vibrace měřili na řezné hlavici.

4.3.4 Shrnutí měření

Jednotlivá měření nám přinesla jasné, jednotné frekvenční schéma vibrací řezné hlavy. Spektra obsahují vždy 1 až 3 výrazné píky od 5 kHz do 8,5 kHz a 1 málo výrazný pik kolem 1,4 kHz. Výjimka nastala při měření vrtání s použitím abraziva karbidu křemíku (viz níže). Schémata jsou ovlivněna délkou času výřezu, který byl použit k frekvenční analýze. Zvyšování délky analyzovaného signálu mění tvar spektra a také zvětšuje rozlišovací schopnost ve spektru. RMS časového signálu nám přinesla informaci o energii obsažené v signálu, resp. o výkonu kmitání. To znamená, že čím větší je RMS, tím více řezná hlava kmitala. Schémata mohou být také ovlivněna vlastní frekvencí řezné hlavy a jejich komponent, abrazivem, průtokem abraziva, zpětnými vlnami vody a abraziva ze sběrné nádrže apod. Některé z těchto vlivů se podařilo prokázat.

Jednotlivé experimenty se odlišují drobnými nuancemi ve schématech, ale zachovávají charakter zmíněný výše. Zajímavá je také skutečnost, že každý akcelerometr naměřil trochu odlišné spektrum.

Vrtání různých materiálů přineslo schéma s 1 až 2 výraznými píky, ale některá schémata se zdají být spíše zašuměná. U materiálu K8 a K9 je schéma výrazně roztáhnuté k frekvencím kolem 4 *kHz*. U ostatních materiálů se tento pík kolem 4 *kHz* projevil jen nevýrazně, nebo vůbec. Experiment nám nepotvrdil přímé souvislosti abraziva, nebo řezaného materiálu s vibracemi řezné hlavice.

U stříkání do vody se schémata jednotlivých akcelerometrů od sebe vzájemně nejvíce liší. Akcelerometr 1 má většinou 3 výrazné vidličkovité píky. Oproti tomu akcelerometr 2 má nejčastěji 1 výrazný pík. Poslední akcelerometr má zpravidla schodovitý jeden pík. Měření S19 vybočuje z pravidelného schématu ostatních měření S (prostřední pík „ve vidličce“ chybí). Měření bylo realizováno jako první v tomto experimentu, proto nelze vyloučit, že před dalšími záznamy byla provedena nějaká zdánlivě bezvýznamná změna (např. přidání krycí desky na x-y stůl chránící počítač před odstříkem vody), která se pak projevila změnou schématu akcelerometru 1. Experiment prokázal vliv hmotnostního průtoku abraziva na efektivní hodnoty signálu.

U vrtání s různými abrazivy se schéma trochu odlišuje. U všech třech akcelerometrů převládá 1 hlavní pík. Schéma u karbidu křemíku, jak jsem již avizoval, vypadá úplně odlišně. Pík kolem 1,4 *kHz* je velmi výrazný. Po té se objeví maximální pík kolem 2,5 *kHz*, resp. 3,5 *kHz* a případně následují 2 až 3 píky na vyšších frekvencích. Rozdílnost schématu přisuzuji jednak změně vlastní frekvence stroje díky použití usměrňovací trubice o větším vnitřním průměru a také větší odolnosti abraziva. Experiment potvrzuje, že průměr trubice a zrnitost abraziva může výrazně změnit vibrace na řezné hlavici.

Závěr

Cílem bakalářské práce bylo posoudit přínosnost měření vibrací řezné hlavice pro diagnostiku technologie abrazivního vodního paprsku. Pro splnění tohoto cíle bylo nutno nastudovat teoreticky několik různých okruhů, protože bez teoretických znalostí chybí při řešení praktických problémů dostatečné množství souvislostí. Dále jsem se věnoval praktické části přímo v laboratoři.

Jako první bylo třeba seznámit se podrobněji s vodním abrazivním paprskem, jak po teoretické stránce, tak i pro praktické, v laboratoři kapalinového paprsku. V teorii jsem nastudoval základní rovnice proudění tekutin a jejich uplatnění v teorii kapalinového paprsku. Tak jsem se seznámil s nejdůležitějšími fyzikálními veličinami, které ovlivňují účinnost této technologie. Při přechodu k praktické části jsem nastudoval přehled technických parametrů a fyzikálních veličin vodního abrazivního paprsku kvůli odhadu, které veličiny a parametry by změnami mohly ovlivnit vibrace na řezné hlavici.

Druhá základní část teoretické přípravy spočívala v obecném seznámení s vibrodiagnostikou. Bylo třeba pochopit základní principy, abych tuto disciplínu uměl použít a aplikovat v trochu odlišné oblasti, než se používá běžně. S tím souviselo i nastudování problematiky akcelerometrů, abych pochopil jejich podstatu a aplikoval ji při měření vibrací na řezné hlavici. Posledním důležitým bodem, který předcházel praktické části, byla analýza signálu. Bylo potřeba propojit teorii s programem LabVIEW a postupně dojít s nejlepším možným řešením při vyhodnocování signálů.

Součástí zadání bakalářské práce bylo provedení literární rešerše k zadané problematice. V databázích Web of Science a Scopus jsem vyhledal publikace, které se týkaly tématu a pět, z mého pohledu nepřínosnějších, jsem důkladně analyzoval. Závěry plynoucí z této analýzy jsou shrnuty v kapitole 3. Protože se v článcích vyskytovaly termíny vibrace a akustická emise, zařadil jsem do této kapitoly jejich přesné vymezení.

V experimentální části jsem se soustředil na tři typy měření, které jsem na základě provedené rešerše vytipoval jako potenciálně nejvhodnější pro hledání souvislostí mezi technickými parametry, resp. fyzikálními veličinami a detekovanými vibracemi. Výsledky naměřených signálů nepřinesly jednoznačné odpovědi k problematice kontroly při obrábění vodním abrazivním paprskem. V každém z našich měření se objevila závislost parametrů na vibracích, avšak globálně ve všech třech se tyto poznatky nepromítly.

Závislost dominantní frekvence a jí odpovídajícího maximálního píku na obráběném materiálu se neprokázala. Jsem přesvědčen, že jestli se nějaký signál ve frekvenční oblasti vibrací vrací z obrobku zpět k řezné hlavici, je natolik malý, že je s dostupným přístrojovým vybavením takřka neměřitelný, protože není možno jej odlišit od šumu. Závislost vibrací na hmotnostním průtoku abraziva je prokázána v podkapitole 4.3.2. RMS roste s větším hmotnostním průtokem abraziva. Prokázala se závislost frekvence maxima spektra na vnitřním průměru trubice. Opotřebovaný vnitřní průměr v trubici se projeví nižšími frekvencemi maximálních píků ve spektru.

Nemyslím si, že pro budoucí výzkum kontroly a on-line řízení obrábění v této oblasti je přínosem měřit vibrace na řezné hlavici. Spíše bych se přikláněl k měření vibrací na obrobku. Nicméně měření signálů na řezné hlavici je pohodlnější pro obsluhu, než měření na obrobku, který se mění a bylo by tak nutné čidla neustále znovu připevňovat. Při měření signálů na řezné hlavici jsem přesvědčen, že akustické emise jsou mnohem přínosnější pro kontrolu úběru materiálu, neboť se šíří v objemu tělesa. Při vysokoenergetickém paprsku, který můžeme považovat za pevné těleso, je možné, že se tak budou signály akustické emise šířit z obrobku zpět na řeznou hlavici.

Dosavadní experimenty, které jsou shrnuty v této práci, neumožňují formulovat jednoznačné závěry týkající se měření vibrací řezné hlavy. Vzhledem k tomu, že do zpracování nebyly zahrnuty záznamy vibrací hlavy během řezu materiálu, nelze s jistotou posoudit na základě vlastních měření, že signály mohou být využity pro on-line řízení úběru materiálu případně pro ovlivňování kvality povrchu řezu. Zatím lze říct, že zmírnění vibrací řezné hlavy je ovšem přínosné pro kvalitu povrchu obráběného materiálu. Pro on-line kontrolu kvality povrchu řezu bude v budoucnu třeba provést experimenty k zajištění informací, které veličiny lze ihned během procesu řezání upravovat tak, aby výsledná kvalita povrchu řezu odpovídala požadavkům. Na základě poznatků získaných při vypracování bakalářské práce navrhuji zabývat se pro tyto účely především RMS časového signálu.

Bibliografie

- [1] HORÁČEK, Lukáš. *Využití nekonvenčních paprskových technologií (LASER/vodní paprsek) ve strojírenství* [online]. 2008 [cit. 2018-02-20]. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Karel Osička.
- [2] Mining methods of the Klondike Gold Rush. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. Wikimedia Foundation, 2018 [cit. 2018-02-20]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Mining_methods_of_the_Klondike_Gold_Rush
- [3] LABUS, Thomas. *Fluid jet technology: fundamentals and applications*. St. Louis, MO: Water Jet Technology Association, 1991. ISBN 1-880342-01-4.
- [4] HLAVÁČOVÁ, Irena. *Využití netradičních fyzikálních principů pro zvýšení efektivnosti kapalinového paprsku v automatizovaných systémech*. Ostrava, 2005. Disertační práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [5] Water jet cutter. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2018 [cit. 2018-04-02]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Water_jet_cutter
- [6] KALIČINSKÝ, Jiří. *Řízení technologických parametrů kapalinového paprsku při porušování materiálů* [online]. Ostrava, 2009 [cit. 2018-02-20]. Disertační práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [7] PÍŠKA, Miroslav. *Speciální technologie obrábění*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN 978-80-214-4025-8.
- [8] RABANI, Amir, Iulian MARINESCU a Dragos AXINTE. Acoustic emission energy transfer rate: A method for monitoring abrasive waterjet milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2012, **61**, 80-89 [cit. 2018-02-20]. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2012.05.012. ISSN 08906955.

- [9] HASSAN, Ashraf, C. CHEN a R. KOVACEVIC. On-line monitoring of depth of cut in AWJ cutting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2004, **44**(6), 595-605 [cit. 2018-02-20]. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2003.12.002. ISSN 08906955.
- [10] HREHA, Pavol, Agata RADVANSKA, Lucia KNAPCIKOVA, Grzegorz KRÓLCZYK, Stanisław LEGUTKO, Jolanta KRÓLCZYK, Sergej HLOCH a Peter MONKA. Roughness Parameters Calculation By Means Of On-Line Vibration Monitoring Emerging From AWJ Interaction With Material. *Metrology and Measurement Systems* [online]. 2015, **22**(2), - [cit. 2018-02-20]. DOI: 10.1515/mms-2015-0024. ISSN 2300-1941.
- [11] ŠUPOLÍKOVÁ, Gabriela. *Zpracování odpadních materiálů po aplikaci abrazivního vodního paprsku* [online]. Ostrava, 2014 [cit. 2018-04-02]. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [12] VONDRA, Adam. *Návrh a realizace testovacího laboratorního zařízení pro přípravu řezání systémem CCS - Cobra* [online]. Ostrava, 2016 [cit. 2018-02-20]. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [13] ČIKOVOVÁ, Martina. *Vyhodnocení dopadu náhlých tlakových změn ve vysokotlakém řezacím systému na obsluhu* [online]. Ostrava, 2013 [cit. 2018-02-20]. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [14] Venturiho efekt. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. Wikimedia Foundation, 2017 [cit. 2018-02-20]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Venturiho_efekt
- [15] HASHISH, Mohamed. WaterJet Machining Process. NEE, Andrew Y. C., ed., Andrew NEE. *Handbook of Manufacturing Engineering and Technology* [online]. London: Springer London, 2015, s. 1651-1686 [cit. 2018-05-07]. DOI: 10.1007/978-1-4471-4670-4_75. ISBN 978-1-4471-4669-8.
- [16] Kavítace. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. Wikimedia Foundation, 2017 [cit. 2018-02-20]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Kavítace>

- [17] BĚLÍK, Jan. *Vliv parametrů hadicového vedení na koncový tlak vody v řezacích systémech* [online]. Ostrava, 2015 [cit. 2018-02-20]. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [18] NOSKIEVIČ, Jaromír. *Mechanika tekutin*. Vyd. 1. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1987.
- [19] HASHISH, M. *Prediction Models for AWJ Machining Operations: Proc. of the 7th American Water Jet Conference, M. Hashish (ed.)*. WJTA, Seattle, Washington, 1993. 175-189.
- [20] HLAVÁČ, Libor. Teoretický model abrazivního kapalinového paprsku. *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava. Řada hornicko-geologická* [online]. 2001, 47(1), 51-62 [cit. 2018-04-12]. ISSN 0474-8476.
- [21] HLAVÁČ, Libor. *Makroskopický fyzikální popis interakce kapalinového paprsku vysoké energie s materiálem: Macroscopic physical description of high-energy liquid jet interaction with material*. V Praze: České vysoké učení technické, 2006. ISBN 80-01-03465-8.
- [22] HREHA, Pavol, Agáta RADVANSKÁ, Sergej HLOCH, Vincent PERŽEL, Grzegorz KRÓLCZYK a Katarína MONKOVÁ. Determination of vibration frequency depending on abrasive mass flow rate during abrasive water jet cutting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2015, 77(1-4), 763-774 [cit. 2018-04-01]. DOI: 10.1007/s00170-014-6497-9. ISSN 0268-3768.
- [23] LISONĚK, Petr. *Vibrodiagnostika obráběcích center Multilathe* [online]. Ostrava, 2017 [cit. 2018-03-03]. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [24] RENTKA, Josef. *Měření při experimentálním ověřování opotřebení* [online]. Ostrava, 2013 [cit. 2018-03-02]. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.

- [25] ICP PCB 352C33. *PCB PIEZOTRONICS* [online]. [cit. 2018-03-03]. Dostupné z:
<http://www.pcb.com/products.aspx?m=352C33#tabs-2> a
http://www.pcb.com/Resources/Technical-Information/Tech_Accel
- [26] VDOLEČEK, František. *SPOLEHLIVOST A TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA* [online]. 2002 [cit. 2018-04-16]. Dostupné z: <http://autnt.fme.vutbr.cz/lab/a1-731a/FSD.pdf>. Text pro podporu výuky v kombinovaném studiu. Vysoké učení technické v Brně.
- [27] BORTLÍK, Pavel. *VIBRODIAGNOSTICKÝ SYSTÉM* [online]. Brno, 2015 [cit. 2018-04-03]. DIPLOMOVÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [28] HORT, Filip. *Využití metody akustické emise pro zpřesnění diagnostiky vzniku poškození radiálních ložisek* [online]. Brno, 2011 [cit. 2018-04-03]. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [29] AXINTE, D.A. a M.C. KONG. An integrated monitoring method to supervise waterjet machining. *CIRP Annals* [online]. 2009, **58**(1), 303-306 [cit. 2018-04-16]. DOI: 10.1016/j.cirp.2009.03.022. ISSN 00078506.
- [30] MIKLER, Jerzy. On use of acoustic emission in monitoring of under and over abrasion during a water jet milling process. *Journal of Machine Engineering* [online]. **2014**(142), 104-115 [cit. 2018-04-01].
- [31] KRENICKY, Tibor a Miroslav RIMÁR. Monitoring of Vibrations in the Technology of AWJ. *Key Engineering Materials* [online]. 2011, **2012**(496), 229-234 [cit. 2018-04-01]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.496.229. ISSN 1662-9795.
- [32] GEMBALOVÁ, Lucie. *Určování fyzikálně - mechanických vlastností materiálu z jeho porušení kapalinovým paprskem* [online]. Ostrava, 2010 [cit. 2018-05-07]. Disertační práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.

Seznam použitých fyzikálních veličin

| | |
|--------------------------------|---|
| $d [m]$ | průměr trubice |
| $E_z [J \cdot kg^{-1}]$ | ztrátová měrná energie |
| $f_{max} [Hz]$ | maximální frekvence |
| $f_{vz} [Hz]$ | vzorkovací frekvence |
| $g [m \cdot s^{-2}]$ | tíhové zrychlení |
| $h [m]$ | výška |
| H | tvrdost kovu |
| $h_z [m]$ | ztrátová výška |
| $l [m]$ | délka trubice |
| $m_a [kg \cdot s^{-1}]$ | hmotnostní průtok abraziva |
| $m_w [kg \cdot s^{-1}]$ | hmotnostní průtok kapaliny |
| N | počet vzorků |
| $p [Pa]$ | tlak |
| $p_1 [Pa]$ | tlak uvnitř nádoby |
| $p_0 [Pa]$ | tlak vně nádoby |
| $Q_m [kg \cdot s^{-1}]$ | hmotnostní průtok |
| $Q_V [m^3 \cdot s^{-1}]$ | objemový průtok |
| $S [m^2]$ | průřez |
| $T [s]$ | konečný časový interval |
| $v [m \cdot s^{-1}]$ | rychlost |
| $v_0 [m \cdot s^{-1}]$ | rychlost kapalinového paprsku bez přísad na výstupu trysky |
| $v_a [m \cdot s^{-1}]$ | rychlost abrazivního paprsku na výstupu z usměrňovací trubice |
| $\Delta t [s]$ | časový interval vzorkování |
| $\delta [\%]$ | relativní odchylka |
| ζ | místní ztráty |
| η | součinitel směšování v teorii Hashishe |
| λ | součinitel ztráty třením |
| $\rho [kg \cdot m^{-3}]$ | hustota |
| $\rho_{exp} [kg \cdot m^{-3}]$ | hustota materiálu experimentální |
| $\rho_{tab} [kg \cdot m^{-3}]$ | hustota materiálu tabulková |
| $\sigma_t [MPa]$ | pevnost v tahu |

Seznam obrázků

| | |
|---|----|
| Obrázek 0.1 Těžba zlata na potoce Bonzana Creek, 1889. [2] | 9 |
| Obrázek 1.1 Schéma řezné hlavice vodního abrazivního paprsku s přísáváním [11]... | 13 |
| Obrázek 1.2 Schéma principu řezání vodním abrazivním paprskem. [7] | 14 |
| Obrázek 2.1 Základní typy piezoelektrických akcelerometrů. [24] | 24 |
| Obrázek 2.2 Pracovní rozsahy snímačů. [24]..... | 24 |
| Obrázek 2.3. ICP akcelerometr [25]..... | 25 |
| Obrázek 2.4 Správné uchycení snímače a jeho vliv na úroveň signálu. [24]..... | 25 |
| Obrázek 4.1 Ni PXIe-1073 | 39 |
| Obrázek 4.2 NI ExpressCard - 8360 | 40 |
| Obrázek 4.3 Model signálu | 41 |
| Obrázek 4.4 Ukázka programu v LabVIEW | 42 |
| Obrázek 4.5 Časový průběh naměřeného signálu | 43 |
| Obrázek 4.6 Frekvenční spektrum | 44 |
| Obrázek 4.7 Připevnění akcelerometrů na řezné hlavici | 45 |

Seznam tabulek

| | |
|---|----|
| Tabulka 4.1 Vlastnosti materiálů | 45 |
| Tabulka 4.2 Vrtání různých materiálů..... | 46 |
| Tabulka 4.3 Stříkání do vody | 47 |
| Tabulka 4.4 Vrtání s různými abrazivy | 49 |

Seznam příloh

Přílohy jsou v elektronické podobě, obsažené na kompaktním disku přiloženém ve vazbě.

Příloha 1 Frekvenční spektra k tabulce 4.3 Stříkání do vody

| | |
|--------------------|----|
| Grafy 1 S1 | 1 |
| Grafy 2 S2 | 2 |
| Grafy 3 S3 | 3 |
| Grafy 4 S4 | 4 |
| Grafy 5 S5 | 5 |
| Grafy 6 S6 | 6 |
| Grafy 7 S7 | 7 |
| Grafy 8 S8 | 8 |
| Grafy 9 S9 | 9 |
| Grafy 10 S10 | 10 |
| Grafy 11 S11 | 11 |
| Grafy 12 S12 | 12 |
| Grafy 13 S13 | 13 |
| Grafy 14 S14 | 14 |
| Grafy 15 S15 | 15 |
| Grafy 16 S16 | 16 |
| Grafy 17 S17 | 17 |
| Grafy 18 S18 | 18 |
| Grafy 19 S19 | 19 |
| Grafy 20 S20 | 20 |
| Grafy 21 S21 | 21 |
| Grafy 22 S22 | 22 |
| Grafy 23 S23 | 23 |

Příloha 2 Frekvenční spektra k tabulce 4.4 Vrtání s různými abrazivy

| | |
|--|----|
| Grafy 1 australský granát mesh 50 | 24 |
| Grafy 2 australský granát mesh 50_2 | 25 |
| Grafy 3 australský granát mesh 80 | 26 |
| Grafy 4 australský granát mesh 80_2 | 27 |
| Grafy 5 australský granát mesh 120 | 28 |
| Grafy 6 australský granát mesh 120_2 | 29 |
| Grafy 7 indický granát mesh 80 | 30 |
| Grafy 8 karbid křemíku 1 | 31 |
| Grafy 9 karbid křemíku 2 | 32 |
| Grafy 10 karbid křemíku 3 | 33 |
| Grafy 11 křemenný písek | 34 |
| Grafy 12 ukrajinský granát | 35 |

Příloha 3 Frekvenční spektra k tabulce 4.2 Vrtání různých materiálů

| | |
|-------------------------|----|
| Grafy 1 K1 vrt | 36 |
| Grafy 2 K1 vrt2 | 37 |
| Grafy 3 K2 vrt | 38 |
| Grafy 4 K2 vrt2 | 39 |
| Grafy 5 K3 vrt | 40 |
| Grafy 6 K3 vrt2 | 41 |
| Grafy 7 K4 vrt | 42 |
| Grafy 8 K4 vrt2 | 43 |
| Grafy 9 K5 vrt | 44 |
| Grafy 10 K5 vrt2 | 45 |
| Grafy 11 K6 vrt | 46 |
| Grafy 12 K6 vrt2 | 47 |
| Grafy 13 K8 vrt | 48 |
| Grafy 14 K8 vrt 2 | 49 |
| Grafy 15 K9 vrt | 50 |
| Grafy 16 K10 vrt | 51 |
| Grafy 17 K10 vrt2 | 52 |
| Grafy 18 K13 vrt | 53 |
| Grafy 19 K13 vrt2 | 54 |